العدم الخلّاق

مسيرة الكون من النشوء وحتى تشكل الأرض

إعداد: حسين صالح السنيح

دار ظما للطباعة
والنشر والتوزيع

مكتبة الشيوعيين العرب
https://arcommunistslib.site123.me
http://arcommunistslib.cdhost.com
http://arcommunistslib.ucoz.org

نسخه للإنترنت، بواسطة الماسح الضوئي، الصوت الشيوعي
https://communistvoiceblog.wordpress.com
communistvoice@disroot.org

العدم الخلّاق

مسيرة الكون من النشوء حتى تشكّل الأرض

إعداد: حسين صالح السنيح

المحتويات

المقدمة 5
الفصل الأول العدم 8
الكثير من الضجة حول لا شي 8
أفكار مبكرة حول العدم 8
لماذا هذا المقت؟ 10
صنع الفراغ 10
فراغ عارم 13
البحر اللانهائي 17
فراغ هيجز 21
أطوار وتنظيم: 21
التحولات الطورية والفراغ 25
القوى المتغيرة في الفراغ 27
فراغ هيجز 31
الفراغ الجديد 34
بداية الكون 34
التضخم 38
الفصل الثاني كون من لا شيء 46
قصة غموض كونيّة: البدايات 46
قصة غموض كونيّة: وزن الكون 58
ضوء من بداية الزمن 61
الكثير من الضجيج حول لا شيء 75
الكون الهارب 88
الغداء المجاني في نهاية الكون 92
الفصل الثالث البدايات 105

في البدء 105
ليكن نور 114
ليكن ظلام 118
ليكن مزيد من الظلام 123
الفصل الرابع المجرات 137
المجرات المتلألئة 137
أصل المجرات 139
الفصل الخامس الكواكب والأقمار 149
المنظومة الشمسية 149
لماذا كل الأقمار؟ 153
كوكبنا الأرض 154
قائمة المصادر والمراجع 159
إنكليزي 159
عربي ومترجم 160

إلـى حيـن ظهـور الفيزيـاء الحديثـة كان يُعتقـد عمومـاً أنـه يمكـن الحصـول على معرفـة العالـم مـن خـلال الملاحظـة المباشـرة، أن الأمـور هـي كمـا تبـدو، كمـا تدركهـا حواسـنا. ولكـن النجـاح المذهـل للفيزيـاء الحديثـة، الـذي يقـوم على مفاهيـم كمفهـوم فاينمـان الـذي يتصـادم مـع خبراتنـا اليوميـة، أظهـرت أن هـذا ليـس هـو الحـال. وبالتالـي فـإن النظـرة السـاذجة للواقـع ليسـت متوافقـة مـع الفيزيـاء الحديثـة. ولمعالجـة هـذه المفارقـات، سـنعتمد نهجـاً نسـميه الواقعيـة المعتمـدة على النمـوذج.

ستيفن هوكنج

التصميم العظيم

المقدمة

يمكن اعتبار هذا الكتاب كلعبة تركيب، ينطوي كل فصل فيه على جزء من قصة الوجود الكبرى. جمعتها معاً ليظهر معناها الكامل، ليُجاب عن السؤال القديم عن أصل الوجود، لنتذوّق المعرفة العلمية التي صوّرت لنا تاريخ هذا الوجود في مشهد كونيّ عظيم الجمال بعيد كلّ البعد عن الخرافات وحكايات القدماء. وقد اقتصرت على اقتناص الكتب والفصول التي تحمل الثمار الكبيرة لإنتاج هذه الوجبة الكونية المتكاملة. فكل فصل هو لون لا تكتمل من دونه لوحة الكون.

إن أكثر ما يخيف الإنسان القديم هو العيش في المجهول، وكان يرفض الاعتراف بجهله حتى لا يعتريه قلق وجوديّ لن يستطيع التخلّص منه. لذلك حاول القدماء تفسير أصل الوجود بشتى الطرق المُستمدّة من بيئتهم الجغرافية وما واجهوه من مخاطر طبيعيّة لم يكن باستطاعتهم تفسيرها عن طريق حواسهم المجردة. فكلما تصادموا مع ظاهرة طبيعية _خطيرةً كانت أو ثانوية_ كانوا يعزونها إلى قوى خارقة غير مرئية تتمتّع بصفات البشر من غضب ورضى وحب وكره... إلخ، وبهذا استطاعوا النوم ليلاً مُطمئنّين لمعرفتهم كيف يسير العالم من حولهم. فمنذ بدأ الإنسان التفكّر في أصل الوجود ربما كان أول سؤال خطر على باله هو: من أين أتى كل شيء؟ وهنا حيث تبدأ قصتنا، من حيث لم يكن هناك شيء. ويتبعه سؤال عن ماهية هذا العالم الذي يعيش فيه ومكوناته، وفهم هذا السؤال الأخير سيجيبه مباشرة عن سؤال آخر هو: أين أنا من كل هذا؟

إن القارئ في تفاصيل النتاج العلميّ الحديث سيدرك أن الفارق الجوهريّ ما بين العبقرية والجنون هو الدليل والبرهان، ومن هذا أعيد تعريف الجنون ليصبح: (الاعتقاد بدون دليل أو برهان). فالدليل سيّد الأقوال وصخرة صلبة تتكسّر فوقها الخرافات. وما العلم إلّا نتاج الدليل والبرهان فهو صرح تَبني قواعده أفكار العلماء وتُنهي نتائج التجارب العلمية بناءه. وبالطبع فإن هذا التعريف لن ينطبق على سكان العالم القدماء، فلم يكن أمامهم من الأدوات والمقدرات التكنولوجيّة ما يمكّنهم من الوصول إلى مثل هذه الإجابات. ولكن العين تتجه إلى سكان القرن الواحد والعشرين الذين يعايشون نتائج العلم يومياً في كل مكان وفي كل شيء تقريباً. فإنه لمن العار على الأمم أن تعيش في عصر العلم والتكنولوجيا ولا تمتلك من الفضول ما يحثّها لمعرفة من أين أتى الكون وما هو موقعهم فيه. بل إنك لترى أمماً لا تزال متقوقعةً بكلّ رجعيّة على ما حاكه خيال القدماء، ويدافعون عنه بضراوة تدلّ على فقدهم لعقل الدليل. وما كان للعلم يوماً أن يحتكر الحقيقة، ولكنه بجدارة أفضل وأذكى ما وصل إليه العقل البشري في سبيل البحث عنها وإيجادها، فلا حقيقة بلا برهان ولا برهان بلا علم.

وهـا هـي ذي قصـة الكـون بـين يديـك كـما رصدهـا العلـم باكتشـاف وراء اكتشـاف ودليـل وراء الآخـر، سـطّرها العقـل العلمـي بحـبر مـن كانـت حياتهـم رهنـاً لاكتشـاف الحقيقـة كـما هـي، بعيـداً عـن أيّ تحيّـز عرفـه عامـة النـاس.

ومن المفارقات الواضحة التي تهمنا أن بعد إزالة المادة، والمجالات، وكل شيء للوصول إلى الفراغ، فإن الفراغ المترتب عن ذلك على نطاق واسع هو أيضاً تأثير متجمع. فعند النظر على المقاييس الذرية نجد الفراغ عارماً بالنشاط والطاقة والجسيمات.

العدم

فرانك كلوز

الفصل الأول
العدم

الكثير من الضجة حول لا شي

أفكار مبكرة حول العدم:

إن مفارقة الخلق من الفراغ، الوجود وعدم الوجود، قد أثارت كل الثقافات المسجلة، فقبل حوالي ١٧٠٠ سنة قبل الميلاد تنص ترنيمة الخلق في الريجفدا (أقدم النصوص المقدسة) أنه:

لم يكن هناك عدم وجود أو وجود حينذاك.

لم تكن هناك مملكة الفضاء ولا السماء التي وراءها.

ماذا تحرك؟ أين؟

وقد نوقشت هذه الأسئلة من قبل فلاسفة اليونان القديمة. حيث نجد الفيلسوف الطبيعي طاليس (حوالي ٦٠٠ قبل الميلاد) يرفض إمكانية الخلق من العدم، فبالنسبة له لا يمكن لشيء أن يخرج من العدم، ولا أن يختفي شيء إلى العدم. وشمل الكون كله في تعميمه لهذا المبدأ.

ويبدو أنه لم يعرِّف العدم بعد طاليس أحد بغير أنه غياب الأشياء.

ولاستحالة ظهور الأشياء من العدم، يتوجّب وجود كيان تجسدت منه كل الأشياء، وكان طاليس يرى أنه الماء، فالجليد والبخار والسائل هي صور ثلاث للماء، فظن أن الماء يمكنه أخذ عدد لانهائي من الصور الأخرى، فيتكثف على صورة أي شيء آخر. فالفضاء يكون فارغاً من منظور طاليس عند تحول كل المادة فيه إلى الماء السائل الذي هو شكلها الأولي.

كما رفض إمكانية وجود شيء من العدم كل من إبيقور وديموقريطوس وليوكيبوس، الذين يُعدّون مبتكري فكرة الذرات، وهذا يمكِّن من وجود الفراغ كمساحة يمكن للذرات أن تتحرك فيها. فالذرة لا يمكنها أن تتحرك إلى نقطة يوجد بها شيء ما، فحتى تكون الحركة ممكنة لابد من وجود فراغ يسمح لها بذلك. وتصوروا الآن أن الكون مُفرَّغ مليء بذرات متحركة صغيرة إلى درجة أنها لا تُرى بمفردها لكنها تتجمع معاً في تكوينات مرئية. فالذرات تتحرك باستمرار لكن صورتها الإجمالية ساكنة، كبيت النمل الذي يُرى من بعيد ككومة ساكنة لكنك تلاحظ أفراد النمل فيها إذا اقتربت منه.

تتقارب أفكار أتباع المذهب الذري مع الصورة التي نملكها اليوم عن المادة، لكن على مدار ألفي عام كانت أفكار أرسطو هي التي طغت، حيث رأى أن لابد للفراغ أن يكون منتظماً ومتناظراً بشكل تام، بحيث يستحيل تمييزه من أي جانب.

نفى أرسطو إمكانية وجود مكان فارغ فيرى أن (الطبيعة تمقت الفراغ). إلا أن تلاميذ جاليليو قد أظهروا أن خطأً في تفسير الظواهر يكمن وراء هذا الاعتقاد. فالطبيعة لا تمقت الخواء، لكن ضغط الغلاف الجوي على الأرض هو ما يُدخِل الهواء في كل مكان متاح. فمن الممكن _كما سنرى لاحقاً_ إفراغ الهواء من الأشياء والحصول على فراغ.

إلا أن هذا سيكون صحيحاً في حال لم يكن هناك سوى الهواء. فقد أوضح العلم لاحقاً أن علينا إزالة ما هو أكثر بكثير من الهواء للحصول على الفراغ. كما أوضح أنه من المستحيل من حيث المبدأ صنع فراغ تام.

ومن حجج أرسطو المنطقية في إنكار وجود العدم هي أنه لو كان الفضاء الفارغ شيئاً، ووضعنا شيئاً في هذا الفراغ، سيصبح هناك شيئان في المكان والزمان ذاته. وإذا أمكن حدوث هذا، فسوف يُعمَّم الأمر ليُسمح لأي شيء بالتواجد في نفس مكان تواجد أي شيء آخر، وهذا هراء. فيرى المنطق الأرسطي أن الفضاء الفارغ لا يُعتبر شيئاً، ولذلك فهو غير موجود. وعرَّف أرسطو الفراغ على أنه غياب أي جسم. ولوجود عناصر الأشياء الأساسية بلا انتهاء، فلا يمكن وجود مكان فارغ تماماً.

لاقت فلسفة مقت الطبيعة للفراغ قبولاً على مدار ألفي عام كبديهة من البديهيات، إلا أنها كانت خاطئةً كما سنرى.

لماذا هذا المقت؟

اعتُبر مقت الفراغ بديهياً فالإله ما كان ليخلق عدماً، لكن هناك حجة أخرى تقول: إن الإله كلّي القدرة، ويمكنه خلق **كل** شيء أو لا شيء. فالقول بأن الإله ما كان ليخلق العدم هو حد من قدرته، وهذا يعني إمكانية أن يوجد وجود الفراغ.

اعتقد جاليليو بإمكانية وجود الفراغ، وهو أول من اقترح اختبار هذه الفكرة بإجراء التجارب. فقد كان اختبار الأفكار المجردة بالطريقة التجريبية فكرة ثوريّة، وخطيرة في نفس الوقت فغالباً كان ينتهي الأمر بالهرطقة والإعدام على خازوق.

وقد أصبحت خصائص الفراغ وأسباب المقت الظاهري مفهومة نتيجة هذه التجارب.

قام جاليليو بوزن وعاء قبل وبعد التسخين، فوجد أن الهواء المتصاعد يأخذ معه بعض الوزن، فكان أول من أثبت أن للهواء وزناً.

كما أدرك جاليليو أن مقاومة الهواء هي التي تؤثر في الأوزان الساقطة، فالريشة تستقر على الأرض أبطأ من الصخرة، ويسقط الحجر وكتلة الرصاص اللذان يمتلكان ذات الحجم وبأوزان مختلفة بنفس المعدل.

فالقطعة الساقطة في سائل لزج، تكاد تتوقف فورياً، وتقل هذه المقاومة في الماء وأكثر منها تقل في الهواء. فاستنتج جاليليو أنه لولا مقاومة الهواء، لسقطت جميع الأجسام بنفس الوقت. وعلى الرغم من عدم تمكنه من صنع فراغ، إلا أن من الواضح أنه لم يملك أي مشكلة فلسفية بإمكانية وجود هذه الحالة من حيث المبدأ. وكان أول إثبات تجريبي لهذا في الرابع والعشرين من أكتوبر عام ١٧١٧ في الجمعية الملكية بلندن أمام إسحاق نيوتن، كما قام بذلك رواد فضاء أبولو حين أسقطوا ريشةً وحجراً على سطح القمر.

صنع الفراغ:

وعلى ما يبدو فإن الطبيعة تقاوم تكوّن الفراغ إلى حدّ معين وبعده تفشل في ذلك، فقد عرف جاليليو أن مضخات السحب لا تتمكن من رفع المياه إلى أكثر من ١٠ أمتار تقريباً. وتساءل عما سيحدث لو استُخدم الزئبق وهو أكثر السوائل كثافةً بدلاً من الماء، وفي عام ١٦٤٣ أجاب تلميذه إيفانجيلستا تورشيللي على هذا التساؤل وبرهنه بالتجربة.

ويمكن تصور التجربة كالتالي: املأ أنبوباً بطول عشرة أو عشرين سم بالزئبق ثم أغلقه من الطرف المفتوح وأنزله في وعاء مملوء بالزئبق، ولا تفتحه حتى يكون الطرف المفتوح مغموراً تحت سطح الزئبق في الوعاء. وعندها يظل الزئبق داخل الأنبوب مكانه لكن طوله يقصر. فلابد للزئبق في الأنبوب أن يصل إلى ارتفاع معين ليقوم بمعادلة الضغط الجوي على الزئبق في الوعاء.

وتبيّن حسب تجربة تورشيللي أن هذا الارتفاع هو حوالي ٧٦ سم. وهنا يكمن السؤال: ماذا يوجد في السنتيمترات الـ ٢٤ في أعلى الأنبوب؟ يبدو أنه فراغ، فالهواء كان عاجزاً عن الدخول، وهكذا أدرك تورشيللي أنه قام بصناعة فراغ.

الضغط هو الوزن الواقع على وحدة المساحة لسطح ما. فالمرء يطفو على الجليد باستخدام الزلاجات وذلك بسبب توزع وزنه فوق مساحة أعرض مما يقلل الوزن على كل وحدة من المساحة.

وفي عام ١٦٤٨ أثبت بليز باسكال أن طول عمود السائل في البارومتر يعتمد على الارتفاع، حيث قاس صهره فلورين بريير ارتفاع عمود الزئبق على ارتفاع ٨٥٠ متراً عند قمة هضبة (بوي دي دوم)، وأجرى قياساً مشابهاً عند السفح، فوجد أن ارتفاع الزئبق عند القمة كان أقل بثمانية سنتيمترات من الارتفاع الطبيعي البالغ ٧٦ سم عند السفح. وبهذا أثبت أن انخفاض عمود الزئبق مع زيادة الارتفاع يعود لانخفاض الضغط الجوي مع الارتفاع، وذلك لأنه كلما

زاد الارتفاع كان الهواء الضاغط علينا أقل ثقلاً. وهكذا اختُرع الألتيمتر الذي يقيس الارتفاع عن طريق قياس الضغط النسبي لمحيط الهواء فوقه.

إن الضغط على ارتفاع ١٠٠ كم يكون أقل من واحد على ألف مليون منه على سطح الأرض، كما يكون على ارتفاع ٤٠٠ كم واحد على مليون مليون، ونحو القمر في الفضاء يصل الضغط إلى 10^{19}. فالغلاف الجوي ليس إلا قشرة رقيقة على سطح الأرض لا تتعدى سماكتها الواحد على الألف من نصف قطر الأرض (وفي هذا مدعاة للتفكر في مدى تأثير الضرر الذي نُحدِثه له بشتى الطرق). ويجتاز رواد الفضاء في رحلاتهم إلى القمر في أول ١٠ كم كمية من المادة أكثر مما يجتازونه في باقي الرحلة.

أسقط اكتشاف الإلكترون التصور القديم الذي يعتبر الذرة أصغر الجسيمات، وكشف عن التركيب المعقد للذرة، حيث تدور الإلكترونات حول نواة مركزية مضغوطة.

قام فيليب لينارد بقذف أشعة من الإلكترونات على الذرات ولاحظ أن الإلكترونات اخترقتها كأن شيئاً لم يعترضها. وقال في هذا: (إن المساحة التي يشغلها متر مكعب من البلاتين الصلب هي فارغة بقدر فراغ الفضاء النجمي خارج كوكب الأرض).

يمكن لذرة الهيدروجين كونها أبسط الذرات أن تعطينا تصوراً عن المقاييس وفراغ الذرة. النواة المركزية هي جسيم واحد شحنته موجبة هو البروتون، ويحدد مدار الإلكترون إطار الذرة الخارجي، وهو جسيم لا يتعدّى حجمه الواحد على الألف من حجم البروتون أو واحداً على عشرة ملايين من حجم الذرة. وبالانتقال من مركز الذرة إلى حافة البروتون نكون قد قطعنا واحداً على العشرة آلاف من المسافة الفاصلة إلى الإطار الخارجي للذرة. وبهذا الاكتشاف نجد أن الذرة تتكون من فراغ شبه تام حيث أن ٩٩,٩٩٩٩٩٩٩٩٩٩٪ من الذرة هو فراغ. مما يجعل من مقارنة فيليب لينارد غير منصفة لحجم الفراغ الهائل في الذرة.

لكن هذا الفراغ الهائل في الذرة مليء بالمجالات الكهربية والمغناطيسية الهائلة القوة وهي التي تمنح الصلابة للمادة على الرغم من فراغ الذرة العظيم، كما أن تأثير هذه القوة يصنع فاصلاً بمسافة ذرة واحدة بينك وبين الأرض التي تقف عليها أو الكرسي الذي تجلس عليه.

الموجات وعدم اليقين الكمي:

تقوم ميكانيكا الكم على خاصية أساسية واحدة للطبيعة وهي استحالة قياس موضع الجسيم وزخمه في نفس الوقت، فمعرفة أحدهما يعني عدم معرفة الآخر. لكن يمكن مقاربة ذلك، فإذا عرفنا أن موضع الجسيم داخل نطاق مسافة قدرها r من نقطة معينة، فيكون زخمه غير معروف على الأقل بالمقدار P حيث: $p \times r \sim \hbar$

و$\hbar$ (تُنطق إتش بار) هي ثابت الطبيعة المعروف بثابت بلانك (مقسوماً على ٢π)، وهو مقدار متناهي الصغر يخص الذرات ومكوناتها.

ويقابل عدم اليقين بين الموضع والزخم، عدم يقين في الزمكان بخصوص الزمن والطاقة، وهذا معناه إمكانية انتهاك مبدأ حفظ الطاقة في المقاييس الزمانية القصيرة جداً، وهذا الانتهاك يستحيل على المرء ملاحظته، فهو أساس عدم القدرة على تحديد الطاقة بشكل دقيق في أي وقت بعينه. فيمكن أن تشع الجسيمات طاقة منتهكةً مبدأ حفظ الطاقة، لطالما تُعيد جسيمات أخرى امتصاص هذه الطاقة في فترة زمنية قصيرة. وكلما زاد إفراط إشعاع الطاقة قصر الزمن الذي يجب أن تُمتص فيه. وهذا الانتهاك الافتراضي لمبدأ حفظ الطاقة يقوم بدور هام في نقل القوى بين الجسيمات. ويكون هذا الانتقال في الصوة الكمية للمجال الكهرومغناطيسي على شكل فوتونات افتراضية، أو حزم كمية، أو جسيمات ضوئية، تسير عبر الزمكان وتنقل القوى للأجسام البعيدة.

فراغ عارم:

هل يمكن لمتر مكعب في الفضاء الخارجي قد أزيلت منه كل الجسيمات أن يكون خالياً من المادة والطاقة؟ إن الإجابة في الكون الكمي هي لا.

إن معرفة عدم وجود أي جسيم في كل نقطة يعني عدم معرفة أي شيء عن الحركة والطاقة. فمع إزالة المادة يقتضي عدم اليقين الكمي وجود طاقة. يُعرف الحد الأدنى للطاقة بـ (طاقة نقطة الصفر) الذي يمكننا تصوره بالتفكير في بندول مكوّن من عدد قليل من الذرات.

وإذا لم يكن موضع الجسيم معروفاً فمن الممكن تحديد سرعته، مما يعني أن تجمعاً صغيراً من الجزيئات المعلقة في خيط من الذرات لا يمكن أن يكون ساكناً بشكل تام، حيث يتدلى رأسياً وتكون كرة الجزيئات ساكنة في أدنى ارتفاع (نقطة الصفر)، إلا أن عدم اليقين يقتضي أنها تتمايل حول الموضع بشكل طفيف، وهذا ما يسمى بحركة نقطة الصفر.

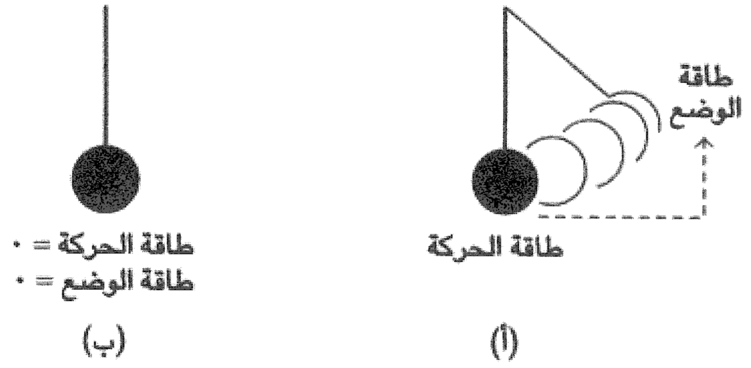
وبتأرجح الجزيئات تحت تأثير الجاذبية ترتفع عن نقطة الصفر، وكلما ارتفعت كلما زادت طاقة الوضع الخاصة بها. وتبلغ طاقة الوضع للبندول المرئي ذروتها عند قمة التأرجح، وتكون طاقة الحركة صفراً، وبالعكس تكون طاقة الوضع عند القاع صفراً وطاقة الحركة تبلغ ذروتها. أما في حالة البندول الكمي (النانومتري) فإن الأمور تكون أكثر دقة، فبتثبيت البندول عند ارتفاع صفر تنخفض طاقة الوضع إلى حدها الأنى، وبالتالي فإن حالتها الحركية ومن ثم طاقتها الحركية تصبح غير محددة. وبالعكس، فإذا خفضنا طاقة الحركة عن طريق إيقاف البندول يكون ارتفاعه فوق

الصفر غير معروف. تقرر ميكانيكا الكم وجود حد أدنى من طاقتي الحركة والوضع، فمن المستحيل أن تكون قيمتهما صفراً في نفس الوقت. وهذ الحد الأدنى هو طاقة نقطة الصفر للتجمع الذري.

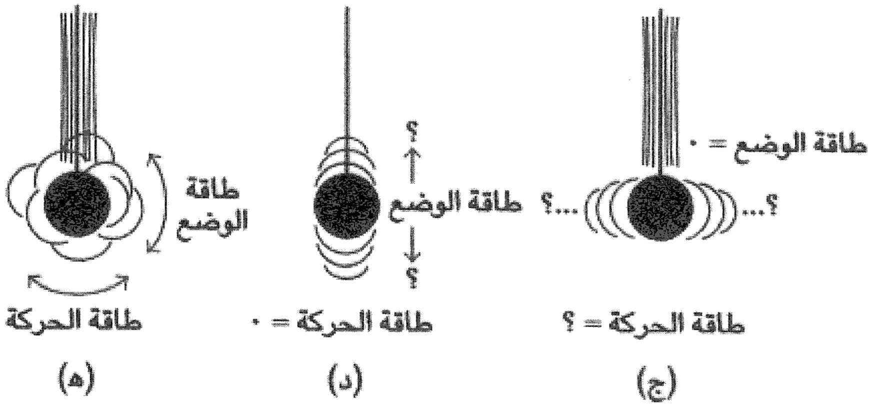
إن طاقة الصفر بالنسبة للبندول المرئي صغيرة لدرجة أنها غير ملحوظة، لكن بالنسبة للتجمعات المكونة من ذرات وجزيئات قليلة، فإن الطاقة الدنيا تكون قابلة للمقارنة بإجمالي الطاقات لتلك المجموعات من الجسيمات. حينها تتجلى طاقة نقطة الصفر عبر الحركة، كحركة الذرات منفردة وحركتها داخل الجزيئات. فنتيجة لحركة الجزيئات في المادة تحدث حرارة، فكلما زادت الحرارة اهتاجت حركة الجزيئات. وتقرر ميكانيكا الكم بقاء نقطة صفر حتى عند درجة الصفر المطلق (-٢٧٣ درجة مئوية) التي هي درجة الصفر الكلفينية، مما يعني استحالة الوصول لدرجة الصفر المطلق حيث كل شيء ساكن بدون زخم أو طاقة.

وهذا ينطبق على أي حجم محدود في الفضاء حتى لو لم يحتوي أي مادة، مما يعني أن أية منطقة محدودة في الفضاء الخالي من كل صور المادة ستكون مليئةً بالطاقة. وتأثير هذه الطاقة يكون صغيراً لدرجة لا تُلاحَظ في المساحات المرئية، لكنها تكون عظيمة في الساحات شديدة الصغر.

بندول تقليدي



بندول كمي



(أ) يبدأ البندول عالياً في حالة سكون: تكون طاقة الوضع لديه كبيرة، وطاقة الحركة لديه صفر. تأرجحه قوة الجاذبية إلى الأسفل، حتى أدنى نقطة حيث تنعدم طاقة الوضع، وطاقة الحركة في حدها الأقصى. خلال التأرجح يكون طاقة الحركة + طاقة الوضع ثابتاً.

(ب) يمكن تعليق البندول عمودياً وفي حالة سكون. تكون طاقة الوضع صفراً وكذلك طاقة الحركة. وبالتالي فإن الطاقة الإجمالية هي صفر.

(ج) في البندول الكمي لا يمكن أن تبلغ طاقة الوضع وطاقة الحركة صفراً في الوقت واحد. وبتعليق البندول عند أدنى نقطة، تكون طاقة الوضع صفراً، وحركته تكون غير محددة، وبالتالي تكون طاقة الحركة لديه غير معروفة. هذه هي (حركة نقطة الصفر).

(د) وعلى العكس، إذا كان البندول ساكناً وطاقة الحركة لديه صفر، يكون موضعه، وبالتالي طاقة الوضع الخاصة به غير محددة.

(هـ) هناك مجموع أدنى لطاقتي الحركة + الوضع يعرف باسم طاقة نقطة الصفر.

وكما يلغي شعاعا ضوء بعضهما إلى الصفر بسبب خصائصهما شبه الموجية، يمكن أن يتحول الصفر إلى شيئين متعادلين. فعلى الدوام هناك تذبذبات تحفز ظاهرة نقطة الصفر. فالفراغ إذن من الرؤية المعاصرة هو حالة تكون الطاقة فيها عند أدنى قدر ممكن، حيث يستحيل إزالة المزيد من الطاقة، وهذا ما يسمى علمياً (الحالة القاعية).

وللتأكد من وجود طاقة نقطة الصفر اقترح هندريك كازيمير عام ١٩٤٨ نتيجة تترتب عليها فيزيائياً، وقد أثبتت بالتجربة العملية أخيراً في عام ١٩٩٦.

فالفراغ هو بحر كمي مكوَّن من موجات نقطة الصفر، بجميع الأطوال الموجية الممكنة من أصغر من المقياس الذري وحتى الموجات الهائلة. فإذا أتيت بلوحين معدنيين ووازيتهما مقابل بعضهما في الفراغ، تبدأ قوة يمكن قياسها تجذب اللوحين نحو بعضهما لكنها قوة لا تستحق الذكر على مقياس (تأثير كازيمير)، الناتج عن طريقة اللوح في خلخلة موجات الفراغ الكمي.

تؤثر موصلية المعادن للكهرباء على أي موجات كهرومغناطيسية في طاقة نقطة الصفر في الفراغ. وبين اللوحين حسب ميكانيكا الكم تستطيع أن توجد فقط الأطوال الموجية ذات القيمة العددية الصحيحة تماماً، فوحدها الأطوال الموجية المتوافقة مع المسافة بين اللوحين يمكنها الظهور، في الوقت نفسه فإن جميع الأطوال الموجية الممكنة يمكن أن تظهر خارج اللوحين. مما يعني أن الضغط على الجانبين الخارجيين أكبر من الضغط على الجانبين الداخليين من اللوحين، مما يؤدي لوجود قوة إجمالية تضغط اللوحين نحو بعضهما. والمقدار الذي يجب أن تكون عليه القوة يتناسب بشكل طردي مع كم بلانك (لكونها تأثير كمّي) ومع سرعة الموجات الكهرومغناطيسية، وتتناسب بشكل عكسي مع المسافة بين اللوحين مرفوعة للقوة أربعة. ويشير هذا إلى تلاشي القوة عند تباعد اللوحين، وهذا منطقي لأنه في حالة الانفصال التام نعود إلى حالة الفراغ الخالي من أي تأثير. وبالعكس، حيث تصبح القوة أكبر عند اقتراب اللوحين أكثر، ويمكن قياس هذه القوة في مثل هذه الظروف، وهكذا نتحقق من مقدار القوة وتفاوت المسافة الفاصلة بينهما.

وهكذا جرى إثبات مبدأ طاقة نقطة الصفر في الفراغ وقياس قوتها وتأكيد تأثيرها. فتأثير كازيمير يثبت أن التغيير في طاقة نقطة الصفر هو كمية حقيقية يمكن قياسها، على الرغم من أن طاقة نقطة الصفر ذاتها لا يمكن قياسها. فمقدار طاقة نقطة الصفر غير محدد فعلياً، ويمكن أن توجد في أي نظام أو فراغ.

توجد حركة نقطة الصفر للمجالات الكهرومغناطيسية دائماً. ويمكن الشعور بالتأثير الخاص بحركة نقطة الصفر عن طريق الجسيمات المارّة عبر الفراغ. فالإلكترون يتذبذب بشكل خفيف أثناء حركته بسبب شعوره بحركة نقطة الصفر الخاصة بالمجالات الكهرومغناطيسية الفارغة.

ونحتاج لمرجعية قابلة للقياس للكشف عن هذا، ويعتبر إلكترون ذرة الهيدروجين دليلاً كافياً على أن الفراغ ليس خالياً تماماً. تبلغ سرعة إلكترون ذرة الهيدروجين حوالي ١٪ من سرعة الضوء، ويقوم مطياف الهيدروجين بكشف التغيرات الحاصلة في الطاقة وتقفّز الإلكترونات بين مدارات الذرات. وتتجلى تغيرات الطاقة بين المستويات على هيئة طاقة ضوء تظهر في خطوط الطيف. وقد استطاعت تقنيات الرادار أثناء الحرب العالمية الثانية في فترة ما بعد الحرب قياس طاقات الطيف والاستدلال على الإلكترونات بدقة تزيد على الجزء من المليون. وهذا ما أدى لاكتشاف إزاحة لامب (نسبة لأول من قاسها ويليام لامب عام ١٩٤٧) وهذه الإزاحة تتفق تمام الاتفاق مع توقعات ميكانيكا الكم للفراغ الخالي متضمناً تأثيرات التذبذبات في فراغ كمي مليء بالنشاط.

فهناك اتفاق عام على أن كل ما نعرفه الآن نشأ من الفراغ الكمي بما في ذلك مصفوفة الزمكان. وهذا الفراغ يعرض تضمينات عميقة لفهمنا لطبيعة الخلق من العدم.

البحر اللانهائي:

إن استقرار المادة والانتظام الدوري في جدول مندليف للعناصر يعود لطاعة الإلكترونات لقاعدة أساسية في ميكانيكا الكم وهي (مبدأ الاستبعاد): لا يمكن لإلكترونين أن يحتلّا نفس حالة الطاقة الكمية. وعند إدراك بول ديراك أن ميكانيكا الكم تتضمن إمكانية وجود نظير إيجابي الشحنة تُعرف بالبوزيترونات قام باستخدام مبدأ الاستبعاد لصنع نموذج للفراغ يؤدي بشكل طبيعي لمثل هذه الكيانات غير العادية. واقترح ألا نعتبر الفراغ خالياً بالمرة، بل مليء بعدد لانهائي من الإلكترونات التي تحتل طاقاتها الفردية كل القيم من السالبة لانهائية وحتى أقصى حد. وهذا البحر الهادئ موجود في كل مكان ولا يُلاحظ لطالما لم يؤثر عليه شيء. وتسمى هذه الحالة الطبيعية بالحالة القاعية، وهي المستوى الأساسي لتحديد كل الطاقات بالمقارنة معه.

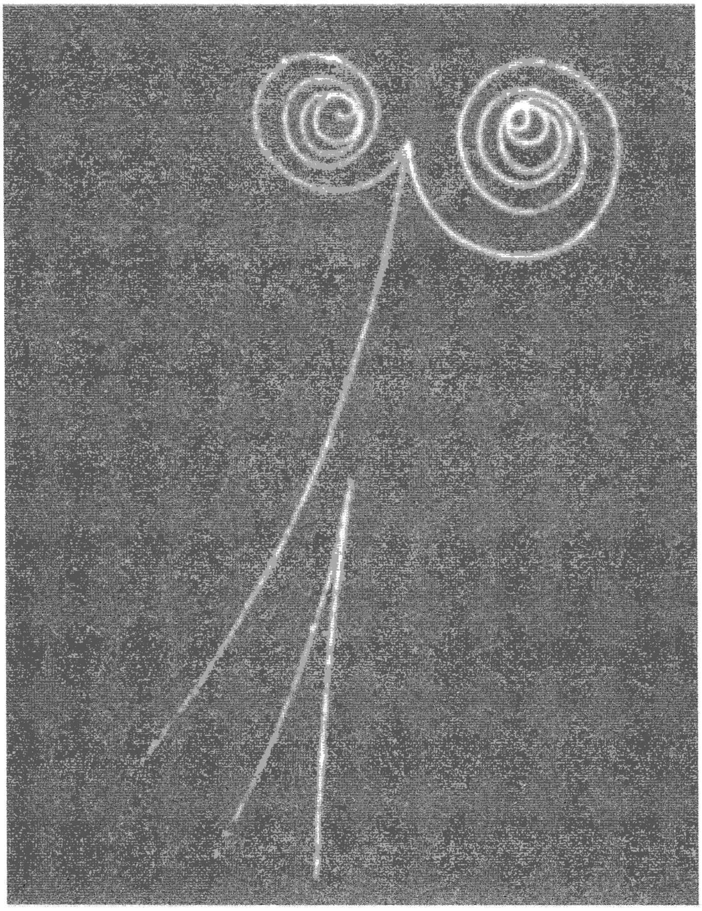
بإعادة ترتيب معادلة أينشتاين (الطاقة= الكتلة×مربع سرعة الضوء) تكون (الكتلة= الطاقة/ مربع سرعة الضوء)، مما يعني أن الكتلة تُنتَج من الطاقة. وللإلكترون والبوزيترون ذات الكتلة×مربع سرعة الضوء، ومتساويان لكن متضادين في الشحنة الكهربية. إذن في حال تجاوزت الطاقة ضعف الكتلة×مربع سرعة الضوء يكون ممكناً ظهور إلكترون وبوزيترون. فيمكن لتقلبات الطاقة في الفراغ التحول تلقائياً لإلكترونات وبوزيترونات ولكنها مقيدة بمبدأ عدم اليقين فتستمر لفترة قصيرة جداً أقل من $\hbar$ / ضعف الكتلة × مربع سرعة الضوء، ما يساوي ١٠$^{-٢١}$ ثانية، وهي فترة قصيرة لدرجة أن الضوء لا يقطع فيها أكثر من واحد على الألف من امتداد ذرة الهيدروجين. ولا يمكن رؤية هذه الجسيمات الافتراضية بأكثر مما يُرى مقدار الانحراف عن حفظ الطاقة الذي تبلغه هذه التذبذبات. مع ذلك فإن التضمينات وراء كون الفراغ مليء بالجسيمات الافتراضية يمكن الكشف عنها عن طريق القياسات الدقيقة.

الجسيم المشحون كهربياً كالإلكترون أو الأيون، يكون محاطاً بسحابة افتراضية من الإلكترونات والبوزيترونات، كما أنه يكون محاطاً بجميع أنواع الجسيمات المشحونة الأخرى وأضدادها، وكلما زاد ثقل الجسيم قل تذبذبه. ولكون الإلكترون والبوزيترون هما الأخف فهما الجسيمان المهيمنان. من تأثيرات هذه السحب هو تعديل شدة القوى الكهربائية بين جسيمين مشحونين. وكلما زادت دقة المجهر الذي ننظر فيه، كلما زادت حساسيتنا لتأثيرات هذه الجسيمات الافتراضية في الفراغ. وبما أن الإلكترون والبوزيترون يظهران ويختفيان في الوجود الافتراضي في جزء واحد على الألف من نصف القطر الذري، فإنهما يمكن أن يؤثران على القوة بين البروتون والإلكترون البعيد في ذرة الهيدروجين. مما يعدل تعديلاً طفيفاً على قانون التربيع العكسي للقوة، كما تؤثر على مغناطيسية الجزيئات كالإلكترون بطرق قابلة للحساب تتفق مع البيانات بدقة تفوق الجزء على المئة مليار.

في تفسير ديراك للفراغ كبحر لانهائي مليء بالإلكترونات، إذا فُقد إلكترون واحد في هذا البحر اللانهائي، فإنه يترك ثقباً في مكانه. فغياب إلكترون سالب الشحنة مع طاقة سلبية بالنسبة لمستوى الحالة القاعية يظهر كجسيم مشحون بشحنة إيجابية بطاقة إيجابية (أي بكل سمات البوزيترون). ويمكن لتذبذبات سطح البحر، بالنسبة لنقطة الصفر أن تنشط الإلكترون المغادر للثقب لحظياً، ويظهر بشكل زوج إلكترون-بوزيترون افتراضي.

يمكن من خلال توفير الطاقة للذرة جعل هذه التذبذبات الافتراضية مرئية. فإذا كانت طاقة الفوتون الذي يُشع الذرة أكبر من ضعف الكتلة×مربع سرعة الضوء، فإنه من المرجح أن يؤين الذرة. ومع ذلك، فمن الممكن أن يتدفق الإلكترون والبوزيترون الافتراضيين ضمن الحقل الذري الكهربي عند إصابة الفوتون لها. في مثل هذه الحالة قد يخرجهم الفوتون من الذرة، مما يترك الذرة هادئة. ويمكن تصوير هذه الظاهرة المعروفة بـ (تخليق الزوج). وبهذا يصبح الجسيمان الافتراضيان حقيقيان.

هذه الأجسام المضادة فيما يرى ديراك هي ثقوب تُركت في عمق بحر الفراغ اللانهائي. وهذا ما يحلّ أيضاً ما يبدو متناقضاً، فإذا كان الفراغ خالياً تماماً، فما الذي يشفر قوانين الطبيعة، وخصائص المادة، حيث تكون جميع الإلكترونات والبوزيترونات الناشئة من الفراغ لها خصائص متطابقة، بكتل محددة بدلاً من الانبثاق في سلسلة عشوائية من الاحتمالات؟ تخضع البروتونات والكواركات والجسيمات المماثلة لمبدأ الاستبعاد وتملأ بحراً عميقاً لا متناهياً يوفر لنا جسيمات تتجسد مادياً.



(تخليق الأزواج)

وفقاً لهذا التأويل، فإن الفراغ هو وسط، وله علاقات عميقة مع الظواهر الحادثة في الواقع كالمواد الصلبة والسائلة حيث أعداد كبيرة من الذرات تُنظم نفسها في أطوار مختلفة. وهكذا يمكن تشبيه الفراغ الكمي بالحد الأدنى الممكن للطاقة، الحالة القاعية لنظام متعدد الجسيمات. ومن آثاره العميقة هو إمكانية تغير طبيعة الفراغ على طول تاريخ الكون. وهذا يثير إمكانية مثيرة للاهتمام، فمن الممكن إضافة شيء إلى الفراغ فيُقلّل من طاقته، مما يصنع حالة فراغ جديدة. فالفراغ السابق ذو الطاقة الأعلى من الحالة القاعية الحقيقية يُعرف بـ (الفراغ المزيف)، والانتقال إلى الفراغ الجديد يُعرف بـ (التغير الطوري). يتنبأ النظريون، وتجارب الفيزياء عالية الطاقة قد تعطي الجواب قريباً، أن شيئاً من هذا قد حدث في وقت مبكر من تاريخ الكون في درجات حرارة تزيد عن المليون مليار درجة.

أطوار وتنظيم:

من الممكن أن يكون لعدد كبير من الذرات والجزيئات ميزات لا يمكن أن تتمتع بها منفردة. وبما أن الفراغ الكمي مليء بالجسيمات، فبإمكانه التمتع بخصائص غير متوقعة بالاعتماد على كيفية تنظيم مكوناته. وتوجد الكثير من الأمثلة المعروفة على هذا، مثلاً إن نشوء ظاهرة ما يتم نتيجة تنظيم أي أجزاء مركبة، في حين أن الظاهرة ذاتها لا تنشأ إذا كانت الأجزاء منفصلة. وفي فن الرسم ما يوضح ذلك، حيث تُرسم اللوحة من خلال بقع منفردة ملونة، ولكن عند النظر من مسافة يصبح الكل منظماً في صورة جميلة. إن عدم كفاية ضربات مفردة من الفرشاة تُظهر أن اللوحة هي نتاج التنظيم.

وعلى نحو مماثل فيمكن (لضربات الفرشاة) الفردية الذرية أن تشكل تنظيماً كاملاً لا تستطيع فعله الذرات منفردة أو حتى في مجموعات صغيرة. وهكذا فإن كل ما يستطيع فعله بروتون واحد أو إلكترون واحد متطابق مع آخر هو جذب أحدهما للآخر من خلال الجذب الكهربي لصناعة ذرات، وتقوم الكهرباء داخل الذرات بتمكين مجموعات الذرات بالتجمع لتكوّن جزيئات، وجمع ما يكفي من الجزيئات معاً يصبح ذاتاً مدركة مثلك.

يمكن لبعض المعادن طرد الحقول المغناطيسية في حال تبريدها إلى درجات منخفضة، معطيةً ما يُعرف بالموصلية الفائقة، لكن الذرات الفردية المكوّنة للمعدن لا تستطيع فعل هذا. وظهور المواد الصلبة والسوائل والغازات من مجموعة كبيرة من الجزيئات كالـ H_2O للماء والجليد والبخار هو مثال يوميّ. ونعتبر من المسلمات أن أرضية الطائرة الصلبة لن تفقد صلابتها في الهواء وترمي بنا إلى الأرض.

يكون التغيير مفاجئاً في بعض المواد، فإن درجة الحرارة أكثر أو أقل من الدرجة ٠ مئوية بكسر تكون الفارق في وجود الجليد من عدمه. وفي مواد أخرى ليس كذلك، فالزجاج على سبيل المثال لا توجد وسيلة معبرة لمعرفة ما إذا كان صلباً أو سائلاً شديد اللزوجة. كما أن الهيليوم يكون غازاً في درجة حرارة الغرفة وسائلاً عند تبريده، لكنه لا يتجمد مهما انخفضت درجة الحرارة، ويتبلور عند تعرضه للضغط.

تظهر هذه الأمثلة أطواراً مختلفة تظهر بالاعتماد على الكيفية التي تنتظم بها الجسيمات. قد تحدث أشياء مثيرة عندما تتجمع المجموعة حين تمر من طور إلى آخر.

في أي درجة حرارة تكون الحالة المنظّمة فيها بأقل قدر من الطاقة تكون الأكثر استقراراً وتأخذ أفضلية تحديد الطور المفضل. ودرجة حرارة الوسط هو مقياس لطاقته، وبخاصة الحرارة

الناتجة عن الطاقة الحركية لمكوناته. وبارتفاع درجة الحرارة تزداد الحركة العشوائية. تحت درجة ٠ مئوي تميل جزيئات الماء للانغلاق على بعضها، وتتشكل بانتظام بلوري، لتشكل أنماط سداسية منحنية نألفها أيام الشتاء في الصقيع على جوانب النوافذ. إن حركة الجزيئات في درجات الحرارة هذه صغيرة بحيث لا تكون طاقة الاصطدامات كافية لتفكيك الروابط التي تحملها. وفوق درجة حرارة ٠ مئوية تكون الطاقة الناتجة عن التصادمات أعلى لدرجة لا تستطيع الجزيئات أن تبقى مرتبطة في بلورات الجليد. بإضافة قطعة جليد إلى الشراب السائل سوف ستصطدم الجزيئات بقوة بجزيئات السائل مما يؤدي لتفككها عن بعضها وسريانها كالسائل أيضاً.

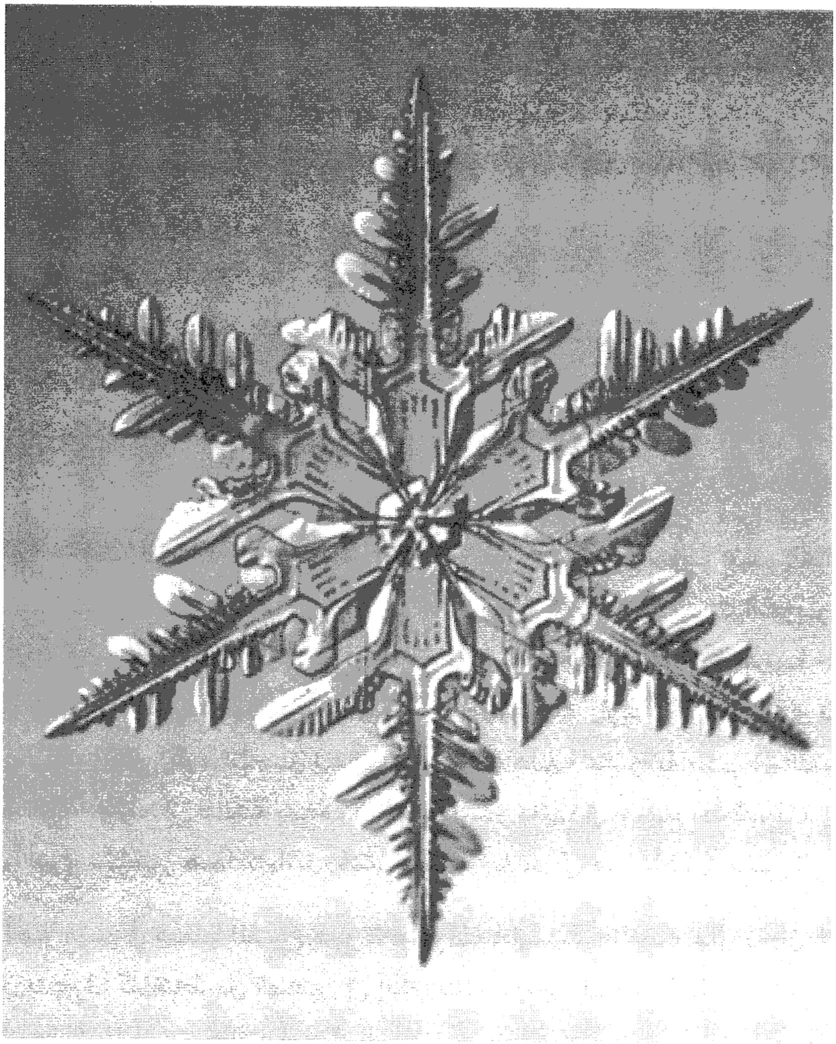
عند حرارة 0 مئوية يتحول مزيج السائل والجليد إلى جليد ففي هذا الطور للجزيئات طاقة أقل مما هي عليه في الطور السائل. وبينما هي تتجمد تنبعث الطاقة الزائدة كحرارة (المعروفة بالحرارة الكامنة) وهي ليست كمية ضخمة من الطاقة، لكن بإمكاننا القيام بتجربة فكرية لتخيل ما يمكن أن يحصل إذا كانت كمية الطاقة ضخمة، تزيد حتى عما يلزم لخلق جزيئات جليد وجليد مضاد. فلو كانت الطبيعة هكذا لظهرت عند انخفاض الحرارة إلى ٠ مئوية ندف الجليد والجليد المضاد بشكل عفويّ من العدم.

وبينما يتم ذلك، تظهر أحجية مثيرة للاهتمام، ففوق درجة ٠ مئوية تبدو الحالة القاعية لجزيئات الماء متماثلة من أي اتجاه تنظر فيه، ونقول إنها متماثلة تحت التدوير. أما ندفة الجليد الفردية ليست كذلك فلها شكل متناظر سداسي حيث أنك لو أدرتها ٦٠ درجة أو مضاعفاتها فسترى نفس شكلها السابق. ولكن إن أدرتها بأي زاوية أخرى فسترى ندفة جليد مُدارة. وبينما تتشكل المليارات من ندف الجليد، اتجاهاتها عشوائية حتى أن الصورة العامة للحالة القاعية الجديدة _المليئة بندف الجليد_ تبدو ذاتها في جميع الاتجاهات. إلا أنه من نقطة إلى أخرى سيُكسر هذا التماثل، فتشير ندفة جليد إلى هنا وأخرى تشير إلى هناك.

مثال آخر مهم في فهمنا للفراغ هو ظاهرة المغناطيسية، الناتجة عن دوران الإلكترونات، فالإلكترون يتصرف كالمغناطيس الصغير. إن إلكترونات الحديد المتجاورة تفضل الدوران في نفس الاتجاه لأن هذا يقلل من طاقتها، وبالتالي يقلل من طاقة المجموعة كلها، وهذا ما يعطي محوراً شاملاً شمالي-جنوبي للمعدن. وهذه في حالة الطاقة الدنيا (الحالة القاعية)، إلا أن الطاقة الإضافية الناتجة عن الحرارة فوق الدرجة ٩٠٠ مئوية تكون أكثر من كافية لتحرر الإلكترونات الدوارة من حبس جيرانها. وفي هذه الحالة تشير هذه المغناطيسات الصغيرة إلى اتجاهات عشوائية وتختفي المغناطيسية الشاملة. لذلك فإن الحديد قد يُظهر طوراً مغناطيسياً أو طوراً غير مغناطيسي تبعاً لدرجة الحرارة.

لو عاشت مخلوقات أسطورية في مثل هذه الأنظمة لاعتبرت حالة الطاقة الدنيا هي القاعدة الأساسية. وكل ما تصورته هذه المخلوقات حول هذه الأنظمة المنظَّمة سيشابه ما نخبره عن

الفراغ في كوننا. فالفراغ الكمي مثل الوسط وليس فارغاً في الواقع. كما بالإمكان تنظيمه في أطوار مختلفة، ويوجد الكثير من الخصائص والظواهر التي قد تنشأ في الانتقال من طور إلى آخر. وهناك شكوك على نطاق واسع أن هذا ما قد أثر على طبيعة الزمكان في اللحظات الأولى من كوننا.



(التناظر السداسي لندفة جليد)

إذاً لدينا الآن منظور جديد على سؤال الفلاسفة القدماء حول ما إذا كانت الطبيعة تسمح بوجود الفراغ. والإجابة ستعتمد على وجهة نظرك، إما لا (أي أن الفراغ مليء ببحر لانهائي من الجسيمات مع تذبذبات كمية) أو نعم، يوجد أنواع من الفراغ (اعتماداً على كيفية تنظيم الوسط الذي هو الفراغ الكمي). وتميل الحكمة المستلمة الفيزيائية إلى الجواب الثاني. وسنتعلم المزيد عن هذا بعد أن نرى كيف للأنماط والشكل أن تظهر مع انتقال الفراغ الكمي من حالة منظمة لأخرى.

التحولات الطورية والفراغ:

إن العديد من الأنظمة المادية لا تُظهر التناظرات الأساسية للقوى التي تبنيها، فالقوى الكهرومغناطيسية لا تهتم باليمين أو اليسار، لكن الجزيئات البيولوجية لها صور معاكسة خاملة أو حتى قاتلة في حين أن أصولها يكون طعاماً أو مواد مفيدة.

وازن قلم رصاص مثالي التصميم وأسطواني الشكل على رأسه. لف القلم، سوف يبدو نفسه. وهذا الثبات عند الدوران يُعرف بالتناظر، وفي هذه الحالة يُعرف بالتناظر الدوراني. واستقرار هذا القلم على رأسه مؤقت لأن قوة الجاذبية ستجذبه إلى الأرض إذا أُزيح من الوضع العمودي بأقل قيمة. إن قوة الجاذبية متناظرة دورانياً، مما يعني أن القلم عند سقوطه على الأرض لا يفضل اتجاهاً على آخر. وإذا أعدت التجربة آلاف المرات ستجد أن القلم سيسقط في جميع نقاط النطاق وفقاً للتناظر الدوراني. ومع ذلك فلا يمكنك أن تقول بأي اتجاه سوف يسقط القلم من خلال تجربة فردية، وبعد أن يسقط في أي اتجاه تكون الحالة القاعية قد كسرت التناظر الدوراني. وفي هذا المثال تكون حالة انكسار التناظر أكثر ثباتاً من حالة التناظر. عموماً فللقوانين الحاكمة لأي نظام قدر من التناظر، لكن في حال كان هناك حالة أكثر ثباتاً تكسر هذا التناظر، فإن التناظر ينكسر تلقائياً أو مخفياً. وهذا ما كان حال ندفة الجليد والماء أو مع مغناطيسية الحديد.

قد يعترض أحد ويقول بأن هذا ليس فشل التناظر، بل يرجع لعدم الدقة في موازنة القلم. وهذا صحيح، ولكن حتى لو افترضنا بأن القلم متوازن في نقطة مثالية فستكون ذرات الرأس في حركة عشوائية نتيجة درجة الحرارة الآتية من طاقتها الحركية. والعشوائية هذه تعني أن اتجاه السقوط عشوائي. قد يوافق لكن يقترح إجراء التجربة في درجات حرارة تقترب من الصفر المطلق (-٢٧٣ مئوية)، حيث تميل طاقة الحركة إلى التلاشي. تفترض هذه التجربة الفكرية أن قمة القلم مصممة من جزيئات مثالية الكروية والجزيء المحوري متجمد في مكانه عند حرارة الصفر المطلق حيث توقفت الحركة الحرارية. وهنا تتولى ميكانيكا الكم المسؤولية. فبتلاشي الحركة يكون الموضع غير معروف، ونقطة التوازن نفسها تصبح عشوائية. وإن عرفنا النقطة بدقة في لحظات، فستكون الحركة غير محددة ولا يمكن التنبؤ باختلال التوازن الناتج. يبدو هنا، وعموماً، أن نسيج الطبيعة الكمي يسمح لحالة عدم الاستقرار عالية الطاقة أن تختار حالة من الطاقة الأدنى حيث ينكسر التناظر فيها تلقائياً. وهكذا فإن ذوبان الجليد أو تسخين المعدن الممغنط يسبب عودة التناظر، ولكن هذا التناظر سينكسر في حال أعدنا تبريده مرة أخرى من غير تذكر ما كان عليه مسبقاً.

تقول القاعدة بأن رفع درجة الحرارة يسبب ذوبان البنية والتعقيد ليعطي نظاماً أكثر بساطة.

والكون اليوم بارد، فمختلف القوى وأنماط المادة هي بُنى متجمدة في نسيج الفراغ. فنحن بعيدون جداً عن الحرارة الشديدة في أعقاب الانفجار الكبير، لكن إن قمنا بتسخين كل شيء مجدداً، فستختفي جميع البنى والهياكل. فللذرات وأنماط جدول منديليف معنى فقط عند درجات الحرارة الأقل من ١٠ آلاف درجة مئوية تقريباً، وفوق هذه الدرجة ستتأين هذه الذرات لبلازما من الإلكترونات والجسيمات النووية كما هي الحال في الشمس. حتى عند درجات حرارة أعلى فإن الأنماط المنصوص عليها في النموذج المعياري للجسيمات والقوى لا تنجو من الحرارة. فعلياً فإن الطاقات فوق ١٠٠ GeV)جيجا إلكترون فولت((التي إذا وجدت في كل مكان فإنها ستوافق حرارة تزيد على $١٠^{١٥}$ درجة مئوية، ستذيب القوة المغناطيسية والقوة النووية الضعيفة التي تتحكم بالنشاط الإشعاعي بيتا إلى تماثل متناظر. فالنظريات التي تصف المادة والقوى كما نراها في الحالة الباردة تشير إلى أن هذه البنى ستذوب وتتحد في الحرارة. ووفقاً للنظريات أيضاً، فإن نمط الجسيمات والقوى الذي يحكمنا قد تكون بقايا عرضية متجمدة عشوائياً من عملية انكسار تناظر عندما تجمد الكون عند حرارة تقارب $١٠^{١٧}$ درجة مئوية. فنحن كالقلم الذي هبط وكان متجهاً نحو الشمال أو عجلة الروليت حيث هبطت الكرة في شق مكّن الحياة من النشوء. ولو هبطت الكرة في مكان آخر، بحيث مثلاً كانت كتلة الإلكترونات أكبر، أو كانت القوة الضعيفة أضعف، لخسرنا حينها في اليانصيب ولما حدثت الحياة.

والآن سنعود إلى اللغز الذي طرحناه في البداية، إن كان كسر التناظر التلقائي قد أوجد عوامل وقوى أخرى، فلن نكون هنا لمعرفة ذلك. وهذا ما أدى لظهور فكرة متطرفة أنه قد يكون هناك العديد من الفراغات، والعديد من الأكوان، حيث أن كوننا تصادف أن كانت فيه القيم المناسبة.

وهنا مثال من قطعة الحديد المغنطة، فإذا سخنتها لدرجة تحطم مغناطيسيتها، ثم بردتها مرة أخرى. في أحد الأجزاء ستشير المغناطيسية الذرية المجمدة إلى اتجاه ما، في حين أن أجزاءً أخرى تشير إلى إتجاه آخر. وهذه الظاهرة معروفة بـ (النطاقات المغناطيسية).

هل يمكن لهذا أن يكون نموذجاً للكون؟ وقد بنى النظريون نماذج رياضية للانفجار العظيم، التي عليها أن تتفق مع ما نعرفه وتعرض التناظر الحقيقي في الفترة المبكرة الحارة من الكون. وتبدو السمة العامة في هذه النماذج أنه حين برد الكون بعد حالته الأولى المتناظرة، كان هناك العديد من الحلول الممكنة. وعندما تنظر في كل المشهد الطبيعي ترى تناظراً أصلياً، مثل اتجاهات القلم الساقط على جميع نقاط النطاق، هناك كتل وقوى تتسق مع التناظر الأصلي. فما يكون صحيح هنا وفي مليارات السنين الضوئية التي يمكننا رصدها، قد يكون مختلفاً في مكان آخر.

القوى المتغيرة في الفراغ:

إن غليان الفراغ يضايق الإلكترونات المارة، من ثم القوى التي يبذلها الجسيم الواحد المشحون على الآخر. في حين أن قانون التربيع العكسي للقوة الكهروستاتيكية طبيعي بالنسبة للمجالات الكهربائية المنتشرة بالتساوي عبر الفضاء ثلاثي الأبعاد، تُظهر البيانات الدقيقة انحرافات خفيفة عنه. فعند التحرك بسرعة ١٪ من سرعة الضوء، تكون تأثيرات نظرية النسبية قابلة للقياس. إن تمدد وتداخل الزمان والمكان يقوم بتشويه سلوك التربيع العكسي فيعطي تأثيرات إضافية خفيفة تنمو بسرعة أكبر من التربيع العكسي عند اقتراب شحنتين من بعضهما. معروفة أكثر بالمغناطيسية، هذه هي التجليات المباشرة لنظرية النسبية. فعند اقتراب شحنتين من بعضهما بشكل أكبر حتى يفصل بينهما مسافة أقل من طول الذرة، يقوم الفراغ الكمي بتشويه هذه القوى.

كما ذكر سابقاً، فإن القوى تنتقل عن طريق جسيمات تحمل الطاقة والزخم من جسم إلى آخر. وفي حالة القوة الكهرومغناطيسية يؤدي تبادل الفوتونات هذه المهمة. فإذا سارت الفوتونات مباشرة من جسيم مشحون إلى آخر دون أي اضطراب، يظهر قانون التربيع العكسي، ولكن إذا قاطع الفراغ الكمي سير الفوتون مثل الذي يتذبذب لإلكترون وبوزيترون افتراضيين، فستتغير شدة القوة بشكل خفيف. فتعمل الشحنتان السالبة والموجبة للإلكترون والبوزيترون الافتراضيين كغطاء حول الشحنة المجردة التي أنتجت القوة. وتُظهر القياسات في مخبر سيرن CERN أنه إذا اقتربت الشحنتان لمسافة تبلغ ما يقارب الواحد على ١٠٠ مليون من قطر ذرة الهيدروجين _أي أصغر من حجم نواتها بألف مرة_ فستظهر القوة الكهرومغناطيسية أقوى مما هي عليه بنحو ١٠٪. وعلى الرغم من أنه ليس ممكناً اختبار هذا تجريبياً حتى الآن، فإن الحسابات تشير إلى أن هذه القوة تزداد عند مسافات أصغر. كما أن الأفكار الحديثة ترى أن القوة الحقيقية للقوة الكهرومغناطيسية قد تكون أقوى بثلاثة أضعاف مما نراه في القياسات الكبيرة. وعندما تتسبب القوة الكهروستاتيكية في جذب قطعة الورق لمشط الشعر على مدى بضعة ملليمترات، أو حتى عندما يأسر البروتون إلكتروناً على طول الذرة، فإن القوة تضعف بسبب شحنات المجالات الافتراضية الكامنة ضمن الفراغ المتداخل. فقط على أقل المسافات _حيث فقط تستطيع التذبذبات المفردة أن تتدخل_ سيتم الكشف عن القوة الكهرومغناطيسية الحقيقية.

وقد غير هذا الاكتشاف وجهة نظرنا للقوى تغيراً جذرياً. فتعمل داخل النواة قوتان أيضاً، معروفتان باسم القوية والضعيفة، وتشهد أسماؤهما بشدتهما بالنسبة للقوة الكهرومغناطيسية. فالنووية القوية هي المسؤولة عن الإمساك بالجسيمات موجبة الشحنة في النواة (وهي البروتونات) بإحكام في حين تعمل قوى التنافر الكهربي المتبادل فيها على تفريقها. وفي داخل البروتونات والنيوترونات نفسها، فإن القوة القوية تُبقي الكواركات في سجنها الدائم. ونشاط بيتا الإشعاعي هو من مظاهر القوة الضعيفة، حيث تتحول نواة عنصر ذري إلى نواة عنصر آخر.

وكـما تحمـل الفوتونـات القـوة الكهرومغناطيسـية، فـإن الجلوُونـات تحمـل القـوة القويـة بـين الكـواركات، في حـين تنتقـل القـوة الضعيفـة بواسـطة بوزونـات W المشـحونة كهربيـاً او بواسـطة بوزونـات Z المتعادلـة الشـحنة كهربيـاً. ويؤثـر الفـراغ في هـذه الجسـيمات بطـرق مختلفـة. فمثـلاً، الجلوُونـات لا تتأثـر بالإلكترونـات والبوزيترونـات والفوتونـات، لكنهـا يجـب أن تشـق طريقهـا خـلال سـحب مـن الكـواركات والكـواركات المضـادة، وحتـى الجلوُونـات الأخـرى في الفـراغ الكمـي. وعـلى العكـس فـإن البوزونـات W وZ يمكنهـا التأثـر بالجسـيمات المشـحونة والجسـيمات محايـدة الشـحنة كهربيـاً وعديمـة الكتلـة تقريبـاً المعروفـة بالنيوترينـوات والنيوترينـوات المضـادة.

تُظهـر الحسـابات إلى أنـه في حـين تنمـو شـدة القـوة الكهرومغناطيسـية عنـد إزالـة تأثـيرات الفـراغ الحاجبـة عـلى المسـافات القصـيرة، فـإن اسـتجابة الجلوُونـات المختلفـة للفـراغ تسـبب إضعـاف شـدة القـوة القويـة في الظـروف المشـابهة.

وهـذا مـا أكدتـه التجـارب. فالقـوى القويـة القابضـة عـلى نـواة الـذرة، وتعطيهـا اسـتقرارها، هـي بالتـالي نتيجـة لتقويـة الفـراغ قبضـة الجلوُونـات عـلى مسـافة ١٠$^{-١٥}$ مـتر. فكتلـة البروتونـات والنيوترونـات وكل المـادة المتجسـدة ناجمـة عـن عمـل الفـراغ الجلـوُوني خـلال الأبعـاد النوويـة. وهـذا مدهـش، لكنـه حقيقـي. فالمقارنـات الناجحـة بـين البيانـات والحسـابات، التـي تفـترض لعـب الفـراغ الكمـي لـدور أسـاسي هـي أكـثر مـن الـلازم لتكـون مجـرد مصادفـات. وعـلاوة عـلى ذلـك، فهـذا يوفـر لنـا تلميحـاً محـيراً، فلـو لم تكـن تأثـيرات الفـراغ، لمـن الممكـن أن تكـون شـدة جميـع القـوى متسـاوية. وإن صـح هـذا، فإنـه يتضمـن وحـدةً عميقـةً لقـوى الطبيعـة في الأسـاس، وأن تعـدد الظواهـر المتباينـة الحادثـة في المسـافات القابلـة للرصـد، مثـل تجاربنـا اليوميـة، يحكمهـا الفـراغ الكمـي الـذي نوجـد فيـه.

يتطلـب اختبـار القـوى والطبيعـة عـلى المسـافات شـديدة الصغـر حيـث تدخـل الفـراغ يكـون ليـس لـه قيمـة دراسـة الاصطدامـات بـين الجسـيمات عنـد طاقـات عاليـة جـداً. ومثـل هـذه الظـروف كانـت سـائدةً في الكـون المبكـر حيـث تتجـلى الحـرارة الشـديدة عـبر الطاقـات الحركيـة العاليـة للجسـيمات. وتتضمـن نظريـة القـوى والفـراغ المتجسـدة في (النمـوذج المعيـاري) لفيزيـاء الجسـيمات أن طـور الفـراغ في الكـون المبكـر كان طـوراً متناظـراً حيـث أبـدت هـذه القـوى بشـكل أسـاسي الشـدة ذاتهـا وكانـت في الواقـع موحَّـدة. وأثنـاء بـرود الكـون، حدثـت تحـولات طوريـة واسـتُبدلت حالـة الفـراغ المتناظـر بحـالات غـير متناظـرة بشـكل متزايـد. وهكـذا فـإن مـا نسـميه اليـوم القـوة القويـة انفصلـت عـن الكهروضعيفـة، وهـو الاسـم الـذي أُعطـى للقـوة الكهرومغناطيسـية والقـوة الضعيفـة التـي لا تـزال موحـدة، عنـد درجـة أعـلى مـن ١٠^{٢٨} درجـة، التـي حدثـت بعـد ١٠$^{-٣٤}$ ثانيـة مـن الانفجـار الكبـير.

وقـد انفصلـت الكهروضعيفـة إلى مـا نعرفـه الآن بالكهرومغناطيسـية والضعيفـة عنـد درجـات حـرارة أقـل بكثـير، حـوالي ١٠^{١٥} درجـة، وهـو مـا يمكـن الوصـول إليـه في تجـارب معمـل سـيرن، وقـد دُرسـت بالتفصيـل. وانكسـار هـذا التناظـر يختلـف عـن التغـير الطـوري الـذي أدى سـابقاً لانفصـال القـوة

القوية. فتبدو القوة الضعيفة ضعيفةً لقصر مداها، فهي تمتد لمسافات أقصر من مدى بروتون، على العكس تماماً من نطاق القوة الكهرومغناطيسية غير المحدود. فنطاقها القصير يعني ضعف تأثيرها على النطاق البعيد، على الرغم من أنها أساساً _في المسافات القريبة، فإن قوتها الطبيعية تساوي القوة الكهرومغناطيسية. فنطاق عملها المحدود هذا، يعود لطبيعة الجسيمين الحاملين لها (بوزون W وبوزون Z): فليس للفوتون كتلة، لكن هذين الجسيمين ضخمان جداً، وتصل كتلتهما لـ ١٠٠ مرة قدر كتلة البروتون. فقط عندما تكون طاقات الاصطدامات أو درجات الحرارة في الكون كبيرة جداً بحيث تجعل من الطاقة المتضمنة في كتلة هذه البوزونات مضروبةً بمربع سرعة الضوء لا يُذكر بالمقارنة، يمكن لوحدة القوى أن تظهر. وهذا يقودنا لأحدث الأبحاث في طبيعة الفراغ، المتعلقة بطبيعة الكتلة وفراغ هيجز.

فراغ هيجز:

لقد عرفنا أن القوة الضعيفة هي ضعيفة بسبب محدودية نطاقها. مقارنةً بمقياس حوالي 10^{-31} متر حيث تكون القوى موحدة ولا قيمة لتأثيرات الفراغ الكمي، يصبح نطاق القوة الضعيفة البالغ 10^{-18} متراً كبيراً لدرجة عظيمة جداً. من حيث الطاقة، فالفوتون عديم الكتلة، أما البوزونان W وZ الحاملان للقوة الضعيفة فكتلتهما تقارب الـ ١٠٠ GeV، على الرغم من صغر هذا مقارنةً مع نطاق الطاقة الفعال في 10^{16} GeV حيث تحدد نطاق التوحيد. وهذا ما يطرح سؤالاً: كيف يمكن للبوزونان W وZ أن يكتسبا كتلةً في حين أن الفوتونات والجلوُونات _التي من المفترض أن تكون على صلة بها_ لا كتلة لها. من المعتقد بأن الإجابة ترجع إلى خاصية في الفراغ، التي تُبحث حالياً في فيزياء الجسيمات عالية الطاقة.

بُنيت النظرية التي تعود لبيتر هيجز، على أفكار حول الموصلية الفائقة المُقترحة من قِبل فيليب آندرسون، والتي يعمل وفقها الفوتون كما لو أنه تكثّف. وكما يشير اسمها فإن الموصلية الفائقة هي خاصية بعض المواد الصلبة في فقد كل مقاومة لتدفق التيار الكهربائي عندما تنخفض حرارتها بما فيه الكفاية. وهذا التغير من كونه عازل نسبي ليصبح موصل فائق هو مثال على التغير الطوري. لكن في الموصلية الفائقة ما هو أكثر من مجرد التدفق الحر للإلكترونات، فهناك ما يُعرف بتأثير مايسنر المتعلق بكيفية سلوك المجالات المغناطيسية في الموصل الفائق أو حوله. قد يتخلل الحقل المغناطيسي مادة صلبة دافئة، لكن عند درجات الحرارة المنخفضة _حيث تصبح المادة فائقة التوصيل_ يتم طرد الحقل المغناطيسي فجأةً من كل مكان ما عدا قشرة رقيقة على السطح. ويصل المجال المغناطيسي فقط لمسافة محدودة داخل المادة الصلبة، x، وبتذكر كيفية ارتباط المدى المحدود للقوة الضعيفة بكتلة الجسيم الحامل، البوزون W، إذن يكون المدى القصير للمجال المغناطيسي داخل الموصل الفائق كما لو كان حامله، الفوتون، قد اكتسب كتلةً بمقدار h/xc، (c هي سرعة الضوء).

إن النظرية المفسرة لهذه الظاهرة عميقة ويمكن كتابة العديد من الكتب عنها، وهذا ما لن نفعله هنا. وبالمِثل يمكن تطبيق المعادلة على القوة الضعيفة، نريد المجال W بكتلة M أن يكون قادراً على اختراق الفرّاغ الفيزيائي فقط لمسافة x= h/Mc. الاصطلاح هنا هو أن الفراغ الفيزيائي الذي تصوره القوة الضعيفة يعمل كموصل فائق.

تعتمد ظاهرة الموصلية الفائقة على وجود مجالات مادية بخصائص خاصة. وفي الموصل الفائق الحقيقي ينشأ طرد الحقل المغناطيسي نتيجة لعمل الإلكترونات التعاوني داخل المادة، مما يُعطي ما يُعرف بـ (تيار الفحص). في حال القوة الضعيفة يتطلب التشبيه وجود بعض حقول المادة في الفراغ. وهذا يختلف بشكل كبير عما قابلناه حتى الآن. فلقد تأملنا بالفراغ الكم المليء بالمجالات الافتراضية والتذبذبات المقاربة للصفر والتي لا يمكنها أن تتجسد إلا إذا توفر لها المزيد من الطاقة. ولكن الآن مع مجال هيجز، نحن نتأمل في شيء له وجود حقيقي في الفراغ. فالفضاء الفارغ الذي ليس فيه مجال هيجز سيكون له طاقة أكثر مما لو كان فيه مجال هيجز. أي أن إضافة مجال هيجز إلى الفراغ يُقلل الطاقة الإجمالية.

ولهذه النتيجة المفاجئة ما يناظرها في المواد الصلبة، كالمغناطيس، فكما رأينا سابقاً، إن المعدن الذي حرارته تفوق درجة حرارة معينة (تُعرف بدرجة حرارة كوري curie temperature) يكون للمعدن طاقة أقل مما لو كان ممغنطاً، ولكن عندما يتم تبريده إلى درجة حرارة أقل من درجة حرارة كوري يصبح المعدن مغناطيساً. وبالتالي فإنه عند درجات الحرارة المنخفضة بما فيه الكفاية، تخفض إضافة المغناطيسية طاقة الحالة القاعية، أو (الفراغ).

ترى النظرية المفضلة في فيزياء الجسيمات أن مجال هيجز يسود الفراغ ويعطي للجسيمات الكتلة الأساسية، وليس فقط لبوزونات W وZ، بل وللإلكترونات والكواركات وغيرها من الجسيمات. وهذا يعني أنه بغياب جسيمات مجال هيجز لن تكون الجسيمات ثابتةً وإنما ستتحرك بسرعة الضوء. ومع ذلك فإن الفضاء مليء بمجال هيجز. وأنت تقرأ هذه الصفحة فأنت تنظر عبر مجال هيجز، فالفوتونات لا تتفاعل معه فتمشي بسرعة الضوء.

إنه حقاً مجال عجيب، فالجسيمات كالإلكترونات المتحركة بأقل من سرعة الضوء تفعل ذلك نتيجةً لتفاعلها مع مجال هيجز الموجود في كل مكان. ومع ذلك، فإنهم يواصلون الحركة دون مقاومة، فقوانين نيوتن تعمل، والجسيمات مستمرة في التحرك بسرعة ثابتة لطالما لم تؤثر عليها قوة خارجية. والجواب الجزئي لهذه الإشكالية يأتي إذا أدركنا أن طاقة الجسيمات تحدد سرعتها، وحقل هيجز هو حالة الفراغ الأدنى طاقة، فلا يمكن نقل طاقة عبر الجسيمات إلى أو من مجال هيجز. وبالتالي يحافظ الجسم على سرعته. ولا يمكن تحديد قيمة مطلقة للسرعة بالنسبة لمجال هيجز. وبالمصطلح التقني: (فراغ هيجز هو فراغ نسبي).

وكما الموصلية الفائقة والمغناطيسية هي أقل حالات الطاقة فقط في درجات الحرارة المنخفضة بما فيه الكفاية، فإن الفراغ الذي يتخلله مجال هيجز هو أدنى حالة طاقة فقط عند درجات حرارة منخفضة بما فيه الكفاية، حيث تعني (منخفضة) 10^{17} درجة. فعند درجات الحرارة الأعلى من 10^{17} درجة، تقترح النظرية أن الحالة القاعية للكون لا تشتمل على مجال هيجز. فأول جزء من التريليون من الثانية بعد الانفجار الكبير كانت حرارة الكون أكثر من هذا، ومنذ ذلك الوقت فقط ملأ مجال هيجز الفراغ، مما أعطى الكتلة للجسيمات الأساسية.

وكما تنتج تموجات المجالات الكهرومغناطيسية حزماً كمية، فوتونات، يجب أن يظهر مجال هيجز في بوزونات هيجز. وعلى نمط الدجاجة والبيضة، فبوزون هيجز نفسه يستشعر مجال هيجز المنتشر في كل مكان فيصبح له كتلة. تتضمن نظرية هيجز بأن هذا البوزون له كتلة ضخمة، تصل إلى ألف مرة كتلة ذرة الهيدروجين. ويتضمن عدم اليقين الكمي أن جسيمات هيجز تتذبذب في الفراغ حيث تظهر وتختفي، وتشير قياسات الدقة لكيفية تأثير الفراغ على حركة الجسيمات كالإلكترونات، وخصائص البوزونات حاملات القوى W وZ، أن هذه الجسيمات تتأثر ببوزونات هيجز أيضاً. وعند مقارنة جميع البيانات، يظهر أن بوزون هيجز قد يكون أخف مما كان يُعتقد سابقاً، يُحتمل أن يكون ١٥٠ مرة كتلة ذرة الهيدروجين. في حلقة سيرن المغناطيسية بطول ٢٧ كيلومتراً يمكن توجيه حزم من البروتونات المسرعة، التي عند اصطدام بعضها ببعض بشكل مباشر يمكن أن تنتج الظروف المناسبة لإنتاج بوزونات هيجز.

لقد استغرق بناء هذا المعجل المعروف باسم (مصادم الهادرونات الكبيرBig Hadron Collider) عشر سنوات، حيث اكتمل بناؤه أخيراً في عام ٢٠٠٧. قد تُجرى التجارب في شهور، وقد تأخذ سنوات لتحليلها وتنقيحها. فإن كان الفراغ حقاً مليء بمجال هيجز، فيجب أن نعرف هذا قريباً جداً[1]*.

الفراغ الجديد

بداية الكون:

بدأنا الكتاب بسؤال (من أين أتى كل شيء؟) وبعد استطلاعنا لأكثر من ٢٠٠٠ عام من الأفكار، وصلنا إلى الجواب المعاصر: (كل شيء أتى من لا شيء.). وتقترح الفيزياء المعاصرة أنه من الممكن أن يكون الكون قد نشأ من الفراغ. فلا علاقة أغرب من علاقة الشيء باللاشيء. فقد يكون الكون تموجاً كمياً عظيم الحجم ذو طاقة (افتراضية) تقارب الصفر والتي يصبح عمره معها غاية في الكبر. ويمكن لهذا أن يحدث لأن الطاقتين الموجبة والسالبة في الكون تعودان إلى طاقة الجاذبية المنتشرة في كل

١ * وقد تم الإعلان عن اكتشاف بوزون هيجز في عام ٢٠١٢، وعلى إثره حصل كل من بيتر هيجز وفرانسوا إنغلرت على جائزة نوبل.

مكان. ولتوضيح ذلك، فمن الأسهل تذكر كيف ثبطت القوى الكهربائية داخل الذرة القوى الدخيلة.

بسبب الشحنة الموجبة لنواة الذرة فإنها محاطة بمجال كهربي يصد الشحنات الموجبة الأخرى، كجسيمات ألفا. تخيل جسيم ألفا بعيد جداً عن النواة ويتحرك نحوها. ستكون الطاقة الإجمالية وقتها هي طاقة الحركة لجسيم ألفا (للتبسيط، سنتجاهل النسبية والكتلة مضروبة بمربع سرعة الضوء، فلن تتأثر الاستنتاجات الأساسية). وكلما اقترب جسيم ألفا من النواة، كلما زاد الشعور بالتنافر الكهربي وتباطأت سرعته. وإن كان على مسار الاصطدام المباشر ففي نهاية المطاف تأتي لحظة سكون قبل أن يُطرد إلى الخلف على طول الطريق الأصلي. وعند اللحظة التي يتوقف فيها، تكون طاقته الحركية تساوي الصفر. يجب الحفاظ على الطاقة الإجمالية، فتتبدل الطاقة الحركية بطاقة الوضع.

عند تفاوت شدة القوة بتغير التربيع العكسي للمسافة، كما هنا، يتفاوت حجم طاقة الوضع عكسياً مع المسافة. وبالتالي، عندما تكون هذه المسافة كبيرة، كما في بداية رحلة جسيم ألفا، فإن طاقة الوضع تقارب الصفر. وكلما اقترب الجسيم ألفا من النواة، كلما زادت طاقة الوضع لديه. وهذا التزايد في طاقة الوضع يقابله انخفاض في الطاقة الحركية حتى لحظة الاقتراب من أقرب نقطة _حيث يكون الجسيم في لحظة سكون_ فتكون طاقة الوضع في أقصى قيمها حيث تساوي كمية الطاقة الحركية التي كانت له عند البداية.

في هذا المثال، جميع الطاقات موجبة، فتتحول في البداية طاقة الحركة الموجبة إلى طاقة وضع موجبة بالاقتراب من النواة. الآن بافتراض أن إحدى الشحنتين كانت سالبة، مثل انجذاب إلكترون بعيد نحو نواة موجبة. إن كان الإلكترون البعيد في حالة سكون في البداية ستكون طاقته الحركية صفراً، وكذلك ستكون طاقة الوضع لديه لبعده عن النواة. فمجموع الطاقتين لديه يساوي صفراً. لكن لوجود طاقة جذب هنا، فسينجذب الإلكترون نحو النواة فيحصل على سرعة وبالتالي طاقة حركية. وبما أنه يجب على المجموع أن يبقى صفراً فإن الزيادة في طاقة الحركة تعني أن طاقة الوضع يجب أن تكون سالبة، وتتزايد باقتراب الإلكترون من النواة. لذا، بالنسبة للقوة الجاذبة يمكن أن تكون طاقة الوضع سالبة.

وهذا ينطبق على الجاذبية، حيث تجذب الكتل بعضها، فإن طاقات الوضع للأرض أو الكواكب المحصورة في مجال جاذبية الشمس سالبة بشكل موحد. في الواقع، فإن مجموع طاقات الحركة والوضع لديها أقل من الصفر، وهذا سبب ارتباطها بالمجموعة الشمسية، وعلقها في مجال جاذبية الشمس، وبالمثل، أنت وأنا عالقون في مجال جاذبية الأرض. فإذا دفعت جسماً إلى الأعلى بطاقة حركية، فإنه سيسقط على الأرض، إلا إذا أعطيته سرعة انطلاق أكبر من حوالي ١٢ كم في الثانية، وهي ما يُعرف بـ (سرعة الإفلات escape velocity). فقط فوق هذه السرعات يصبح مجموع الطاقة الحركية وطاقة الوضع موجباً فيتمكن الجسم من الهروب من جاذبية الأرض،

ومع ذلك، سوف يظل الجسم محصوراً داخل المجموعة الشمسية بطاقة إجمالية سالبة.

قوة الجاذبية منتشرة في جميع أرجاء الكون مع ناتج طاقة وضع سالب لكل شيء محصور داخلها. ومن الممكن أنه حتى بعد ضم الطاقة الناتجة من تحويل كتلة المادة في الكون _بضربها بمربع سرعة الضوء_ فإن الطاقة الإجمالية للكون ستكون تقريباً صفر. وهكذا، وفقاً لنظرية الكم، يمكن أن يكون الكون تذبذب ضخم في الفراغ، حيث تقارب طاقته الإجمالية الصفر، فيمكن له أن يوجد لفترة طويلة للغاية قبل أن يعود لحالة التوازن. وإن كانت طاقته الإجمالية صفراً، فيمكن أن يستمر إلى الأبد.

إن كان الأمر كذلك، من يمكنه القول بأن كوننا هو الكون الوحيد؟ الكثير من النظريين يأخذون هذا الاحتمال في عين الاعتبار، على الرغم من مجادلة الكثيرين فيما إذا كانت هذه الأفكار علمية، أي أنها بمتناول العلم التجريبي.

مع توسع الكون، يتمدد الفضاء ولكن الأجسام تبقى مترابطة مع بعضها بواسطة القوة الكهرومغناطيسية _مثل الكواكب والنجوم_ لا يتغير حجمها، فقط تزيد المسافة بينها. ليس للشعاع الكهرومغناطيسي ما يحمله، ولهذا فإن طول الموجة يمتد مع توسع الكون. ونحن نعرف من ميكانيكا الكم أن طول الموجة يرتبط عكسياً مع الطاقة، وبالتالي فإن إشعاع الخلفية الكونية _الذي هو اليوم بحرارة ٣ درجات فوق الصفر المطلق_ كان في الماضي أشد حرارةً بكثير، ومثل هذه الاستنتاجات تنطبق على المادة، فمع توسع الكون، فإن المادة المحصورة في مجال الجاذبية الشامل ستزيد طاقة الوضع لديها على حساب طاقة الحركة. ويُدرك هذا التباطؤ الكوني على أنه انخفاض في درجة الحرارة. ولذلك فإن من معدل توسع الكون ومعرفة حرارة الخلفية الكونية الآن، يمكننا إعادة حساب وتقدير درجة حرارة الكون في مختلف الحقب الماضية. وتصبح درجة الحرارة أعلى أكثر كلما اقتربنا إلى الحدث المتفرد الذي نسميه الانفجار الكبير.

وقد كان تصادم الجسيمات شديداً جداً في ذلك الوقت، لدرجة أن الذرات لن تكون قادرةً على البقاء عند درجات الحرارة الأعلى من ٤ آلاف درجة مئوية، بل إنها تتأين كما يحصل في الشمس. وعند درجات الحرارة الأعلى من المليار حتى نواة الذرة تتمزق، وكل ما كان موجوداً عند اللحظات الأولى من حياة الكون هو بلازما من الجسيمات والإشعاع. وقبل ذلك كان هناك ما يكفي من الطاقة لظهور جسيمات المادة والمادة المضادة. وكل الأدلة تشير إلى أن كوننا المادي قد جاء من فراغ من الإشعاع الحار.

تُظهر التجارب التي تمت في مسرعات الجسيمات _مثل سيرن_ كيف تتصرف جسيمات المادة والقوى عند الطاقات العالية، وبالتالي عند درجات الحرارة العالية جداً. مما يتيح لنا حساب كيف كان الكون رجوعاً بالزمن إلى درجة حرارة تساوي $١٠^{٢٧}$ درجة، وهو ما يطابق $١٠^{-٣٣}$ ثانية بعد الانفجار الكبير. وكما رأينا سابقاً، عند درجات حرارة مختلفة يخضع الفراغ لتحولات

طوريّة، تم إثبات بعضها وبعضها الآخر أُكد نظرياً. وعند تبرّد الكون لما دون 10^{15} درجة وذلك بعد حوالي 10^{-10} ثانية من الانفجار الكبير، حدث انفصال القوة الكهرومغناطيسية عن القوة الضعيفة، وقد تم إثبات هذا من خلال إعادة خلق هذه الطاقات تجريبياً. وتتوقع النظرية أنه عند درجات الحرارة الأعلى من ذلك بقليل، حيث كان عمر الكون 10^{-12} ثوان، حدث للفراغ تحول طوري تجمد فيه مجال هيجز واكتسبت الجسيمات كتلتها.

إذن، لدينا صورة للكون وهو ينفجر كتذبذب كمي في الفراغ، والذي كان بشكل ما حاراً للغاية وتوسع بسرعة كبيرة. وهذه الصورة عن الكون تقودنا لكميات هائلة من المادة والمادة المضادة المُنتجَة بشكل متناظر، إلا أن لا دليل على نجاة المادة المضادة بكميات كبيرة اليوم. ومن المعتقد عموماً وجود نوع من التناظر بين البروتونات والبروتونات المضادة. ما يزال البحث جارياً عن أصل هذا ولكنه قد يكون مثالاً آخر على انكسار التناظر التلقائي عند مرور الكون بتغير طوريّ.

التضخم:

ما يزال هناك بعض المشاكل في هذا السيناريو، منها مثلاً: من أين جاءت جميع الطاقات الحرارية؟ وعلاوة على ذلك، من خلال خبرتنا في التغيرات الطوريّة في فيزياء المواد المكثفة نعلم أنها لا تكون سلسة بشكل تام. مثلاً، عندما يبرد المعدن الساخن ليكوّن المغناطيس، تختلف شدة المغناطيسية من منطقة لأخرى، لتشكل نطاقات منفصلة من المغناطيسية. هناك مواضع خلل وعدم اتساق في جميع أنحاء المعدن. نفس الشيء يجب أن يحدث في جميع أنحاء الكون عندما خضع للتحولات الطوريّة، وإعطاء ظواهر مثل جدران الطاقة أو الأوتار الكونية، ادعوها ما شئت. في كل حدث، لم تكن هناك رؤية واضحة لأي كيانات غريبة كهذه. أيضاً، تشير النظرية إلى أن مثل هذا التسلسل من الاحداث من شأنه أن يؤدي إلى تطور الكون بسرعة بحيث يكون عمره أكثر قليلاً من عشرات الآلاف من الأعوام بدلاً من المليارات من الأعوام. وقد جاء حل محتمل لهذه الإشكالات مع فكرة آلان جوث وبول شتاينهارت اللذان اقترحا أن الكون هو مجال في كون جامع أكبر. في هذه النظرية _المعروفة باسم نظرية التضخم_ جاء الكون لدينا نتيجةً لتضخم هائل لواحد من هذه النطاقات المايكروسكوبية. ومن النظرة الأولى فإن هذا يبدو مستحيلاً لأنه يتطلب تطاير المادة بعيداً عن بعضها بشكل تلقائي، وهذا ينبغي ألا يحدث عند وجود قوة جذب كونية تعمل. غير أن في النسبية العامة، ليست المادة والطاقة والزخم وحدها ما يُسهم في هذا الأمر، بل والضغط أيضاً، فإذا كان الضغط سالباً وهيمن على المادة والطاقات الحرارية، يمكن أن يتوسع الكون سريعاً، وهو أشبه بتأثير مضاد للجاذبية.

لاحظ آلان جوث أنه إذا كان الفراغ الحقيقي يحتوي على مجال هيجز، فبالإمكان وجود منطقة من الكون في حالة فراغ غير مستقر أو (زائف) _وهو أقرب إلى حالة القلم المتوازن، والفراغ الحقيقي هو عند سقوط القلم_. وتذكّر أن إضافة مجال هيجز إلى الفراغ الزائف

سيخفض الطاقة. وفي الفراغ الزائف تكون الطاقة الإجمالية متناسبةً مع الحجم، وتتطلب زيادة هذا الحجم عملاً. ونظراً لحالة الطاقة المنخفضة في فراغ هيجز، فإن الاتجاه الطبيعي لهذا الفراغ أن ينكمش، وفيما يتعلق بفراغ هيجز الحقيقي فإن حالة فراغ هيجز الزائف هي الحالة التي يكون فيها الضغط السالب فعالاً. لذلك فإذا حدث تذبذب في منطقة فراغ زائف، فإن تأثير جذب الضغط السالب سيتغلب على ذلك الذي للمادة، مما يؤدي إلى التوسع. وأثناء تحول الكون من حالة الفراغ الزائف إلى حالة فراغ هيجز في هذه الصورة، من الممكن أن يحدث تضخم عظيم في وقت بالغ القصر.

هناك أمثلة في فيزياء المواد المكثفة على الأنظمة فائقة التبريد. حيث يبقى النظام فيه في الطور الخاطئ مثل بقاء الماء سائلاً تحت نقطة التجمد الاسمية. ومن الممكن أن شيئاً مشابهاً قد حدث للفراغ الكوني. يظهر التذبذب في الفراغ الزائف ويستمر، وفي وقت لاحق يتحول الكون إلى فراغ حقيقي. وقد أظهرت الحسابات أن في مثل هذه الظروف يمكن لمنطقة من الفضاء أن يتضاعف حجمها كل $١٠^{-٣٤}$ ثانية.

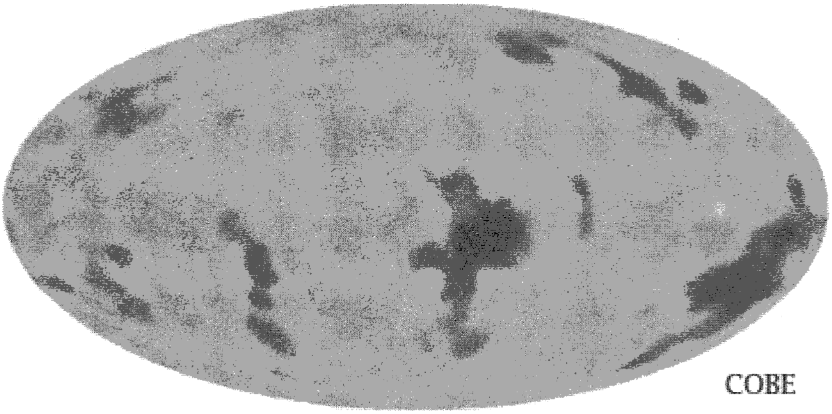
بعد انقضاء فترة التضخم، يؤدي الانتقال إلى الفراغ الحقيقي إلى إطلاق طاقة، مثل انبعاث طاقة الحرارة الكامنة عند تجمد المياه. قامت هذه الطاقة بإنتاج جسيمات المادة التي شكلت في نهاية المطاف المجرات والنجوم، ونحن. يعطي جذب الجاذبية طاقة وضع سالبة تلغي هذه الطاقة، تاركةً الطاقة الكلية مقاربةً للصفر.

ومن المثير للدهشة ما لهذا التضخم من تأثير. فكوننا المرئي الحالي هو حوالي $١٠^{٢٦}$ متراً. وبالاستقراء رجوعاً، عند درجة حرارة $١٠^{٢٨}$ درجة _وذلك عند نهاية التضخم_ كان لكوننا المستقبلي أن يكون حجمه بعض سنتيمترات. كان للتضخم أن يوسع الكون بمقدار $١٠^{٥٠}$، وهو ما يتضمن أن فقاعة التذبذب المبدئية بلغت من الحجم $١٠^{-٥٢}$ متراً فقط، وهو ما يتناسب مع حجم التذبذبات المتوقعة في الجاذبية الكمية.

خلال فترة التضخم حدث توسع أسرع. وكان من السرعة ما جعل بعض الأجسام القريبة من بعضها بما فيه الكفاية لتبادل المعلومات _كالإشعاع_ أن تُقذف إلى أجزاء منفصلة من الكون، لدرجة تمنعها من تبادل المعلومات. على سبيل المثال، تبعد عنا بعض المجرات بحوالي ١٠ مليارات سنة ضوئية في مناطق متقابلة من السماء، مما يعني أنه يفصل بينها أكثر من ١٤ مليار سنة ضوئية، أي أكبر من المسافة التي يمكن للضوء أن يقطعها في عمر الكون. ومع هذا فإن هذه المجرات تظهر نفس قوانين الفيزياء، وأطياف عناصرها _التي هي كرسائل الفاكس الآتية من بعيد الكاشفة عن العناصر وخصائصها_ تبدو هي نفسها في جميع أنحاء الكون المرئي. كما أن درجة حرارة وشدة إشعاع الخلفية الكونية هي ذاتها في كل مكان في الكون بأفضل من جزء في العشرة آلاف. والقول بأن هذا الاتساق وليد الصدفة هو سذاجة. ويجب أن يكون

كل الكون مرتبطاً سببياً في وقت ما في الماضي، وفي غياب التضخم سيكون ذلك مفارقة.

هناك الكثير من الأعمال الرياضية الجارية بشأن كيفية تصرف المجالات في نظرية الكم. ومن النتائج التي تم التوصل إليها في هذا الصدد هو أن التضخم أمر لا مفر منه تقريباً، وهو خبر جيد لتفسير الكون، ولكنه يجعل من الصعب تحديد الآلية الدقيقة. كل ما في وسعنا القيام به في الوقت الحالي هو العمل مما نراه الآن في الكون رجوعاً إلى الوراء، وحساب ما كان يجب أن يكون عليه التضخم، وبعدها نرى إن كان باستطاعتنا اختبار النتائج. إن التذبذبات الصغيرة في بنية الزمكان عند فترة الجاذبية الكمية كانت مصدر جذب لجمع المواد، التي تنمو لتشكل بذرة المجرات. وبإجراء محاكاة حاسوبية لسلوك الكون _مع الأخذ بعين الاعتبار بنيته وجاذبيته الحاليتين_ وعدنا بالزمن رجوعاً، نجد أن شدة تذبذبات الفراغ يجب أن تكون حوالي الجزء من عشرة آلاف. والنتيجة المثيرة هي أن هذه الآثار كان يمكن أن تكون حاضرة في إشعاع الخلفية قبل تشكل المجرات. وفي السنوات القليلة الماضية كان هذا مدعماً بشكل كبير من خلال قياسات دقيقة للإشعاع من قبل القمر الصناعي COBE (مستكشف الخلفية الكونية) والقمر الصناعي WMAP (مسبار ويلكينسون لقياس اختلاف الموجات الراديوية). تظهر هذه الاختلافات على مستوى بضعة أجزاء لكل عشرة آلاف جزء في درجة الحرارة. وعلى وجه الخصوص، يقيسان هذه التذبذبات في مستويات دقة مختلفة، أو زوايا صغيرة، أو امتدادات كبيرة، وتجد السلوك الكسر (كلما زادت الدقة كلما ظهرت تفاصيل أكثر بنمط متكرر). وكما يبدو فإن هذه الظواهر تتفق مع ما هو متوقع إذا كانت آثار متخلفة عن التضخم. ولا عجب أن جائزة نوبل للفيزياء قد مُنحت لقادة هذا البحث في عام ٢٠٠٦.



(الاختلافات في إشعاع الخلفية الكونية الميكروني كما صورها القمران الصناعيان COBE وWMAP)

إذن فإن أفضل بياناتنا تتفق مع النظرية التي مفادها أن كوننا الواسع قد مر بمرحلة التضخم. وإذا كان هذا هو الحال، فلدينا إجابة محتملة لسؤال من أين جئنا؟ فكل شيء يتسق مع صورتنا عن الكون المبنية على الرصد والعلم التجريبي. ولكنها صورة تقدم إجابات على السؤال الأساسي، على حساب إثارة المزيد من الأسئلة التي يحتمل أن تكون أعمق. أتى التضخم بعد الفترة التي هيمنت فيها الجاذبية. وقد أشرنا إلى الخصائص الغريبة للزمكان مع التذبذبات، ورأينا أن إشعاع الخلفية الكونية يظهر ما يبدو أنه آثار حفرية لهذه التذبذبات. ليس هناك سبب للاعتقاد بأن كوننا المتضخم هو _أو كان_ حدث لا يتكرر. قد يكون هناك العديد من الأكوان الأخرى التي انطلقت على نحو مماثل ولكنها تتجاوز إدراكنا. وعند مواجهة مجموعة من المصادفات المذهلة في طبيعة القوى، وكتل الجسيمات الأساسية، حتى وجود ثلاثة أبعاد للفضاء، التي لم تكن لتنشأ ظروف الحياة لولاها، يضطر الإنسان للتساؤل عن سبب ملاءمة هذا الكون لنا. إحدى الفرضيات الشائعة بين العلماء هي وجود أكوان متعددة، يحتمل أن يكون عددها لا نهائياً، بمعاملاتها الخاصة وأبعادها، وواحد من هذه الأكوان حدث وأن كان ملائماً للحياة، وهو هذا الكون الذي تطورنا فيه. مرحباً بك في فرضية الأكوان المتعددة. على الرغم

من التشكك في إمكانية تجريب مثل هذه الفرضيات في المجال العلمي.

ترتبط مشكلتنا بإدراكنا للزمن في بعد خطي بسيط. فإذا تم سرد تاريخ الكون على خط عمودي، فالحاضر سيكون عند نقطة معينة، والمستقبل سيكون في نقطة أعلاه والماضي في نقطة أسفله، ويكون الانفجار الكبير عند نقطة القاعدة. ولكن الخط يتوقف هناك، ولا شيء تحته. ففي هذا المشهد الخطي، لم يكن هناك وقت قبل الوقت. هنا حيث لاح مفهوم العدم، حيث يملأ الشِّعر فراغ عدم فهمنا لحدود خيالنا.

وإن نشأت الأكوان المتعددة نتيجة التذبذبات الكمية، وكان كوننا محظوظاً بقوانينه وأبعاده وقواه المناسبة لتطور الحياة فيه، فإن هذا يطرح مسألة أخرى، وهي كيف ومن أين أتت القوانين الكمية التي سمحت لكل هذا بالحدوث؟

وهكذا تبقى مفارقة الوجود لغزاً لم يُعاد حله بعد حول طبيعة الزمان والمكان.

في الثلاثة آلاف سنة الماضية منذ بدأ فلاسفة اليونان القديمة التفكر في لغز الوجود، وظهور شيء من لا شيء، قد كشف المنهج العلمي حقائق ما كانوا ليتخيلوها. الفراغ الكمي لانهائي العمق المليء بالجسيمات، التي تستطيع أخذ أشكال مختلفة، وإمكانية حدوث تذبذبات كمية هي أمور تقع خارج فلسفتهم. فلم يكونوا على دراية بأن الطاقة الإيجابية داخل المادة يمكن موازنتها بالطاقة السلبية في مجال الجاذبية المنتشر في كل مكان بحيث تقارب طاقة الكون الكلية الصفر، وباقتران ذلك بعدم اليقين الكمي فإنه يتيح إمكانية أن كل شيء هو في الواقع بعض التذبذبات الكمية التي تعيش لوقت ما. كل شيء قد يكون تموجاً كمياً من لا شيء.

ولكن إذا كان هذا هو الحال، يبقى لغز وجود الإمكانية الكمية في الفراغ. ومع كشف العلم للإجابات، فإنه يكشف معه أسئلةً أعمق يجيب عنها المستقبل.

بالتأكيد إن اللا شيء في كل جزء منه هو فيزيائي كما الشيء، وخاصةً إذا عُرِّف بأنه غياب الشيء. ومن ثم فإنه حريّ بنا أن نفهم تحديداً الطبيعة الفيزيائية لكلا الكميتين. وبدون العلم، أي تعريف هو مجرد كلمات

كون من لا شيء

لورانس كراوس

الفصل الثاني

كون من لا شيء

قصة غموض كونيّة: البدايات

تكمـن معظـم الطاقـة في الكـون في غمـوض تعـذّر تفسـيره، ينتـشر في الفضـاء الفـارغ كلـه. وليـس اسـتهانةً القـول بـأن هـذا الاكتشـاف قـد غـير حقـل لعـب علـم الكونيـات المعـاصر.

لـشيء واحـد، وهـو أنه قد أسـفر عن دعـم جديد ملحوظ لفكرة نشـوء الكون من الـلا شيء بالتحديد. كـما أعـاد تفكيرنـا في مجموعـة مـن الافتراضـات بشـأن العمليات الحاكمـة لتطـوره، وأخيراً، مسـألة ما إذا كانـت قوانـين الطبيعـة ذاتهـا أساسـية حقاً. كل نتيجـة في حد ذاتها تميـل الآن لأن تجعل من سـؤال (لماذا هنـاك شيء بـدلاً مـن لا شيء؟) يبـدو أقـل مهابـةً، إن لم تجعلـه يبـدو سـطحياً تمامـاً، كـما آمـل أن أشرح.

كان المجتمـع العلمـي حتـى عـام ١٩١٧ يـرى الكـون اسـتاتيكيّاً (ثابتـاً) وأبديـاً، يتكـون مـن مجـرة واحـدة هـي درب التبانـة Milky Way، تحيـط بهـا مسـاحة واسـعة لانهائيـة مظلمـة وخاليـة. وفي النهايـة، هـذا مـا كنـت لتظنّـه لـو نظـرت في سـماء الليـل بعينيـك المجردتـين أو بتلسـكوب صغـير، وفي ذلـك الوقـت لم يكـن هنـاك سـبب وجيـه للشـك في هـذا.

الجاذبيـة في نظريـة أينشـتاين _كـما في نظريـة الجاذبيـة السـابقة لنيوتـن_ هـي قـوة جاذبـة بحتـة بـين كل الأجسـام. وهـذا يعنـي أنـه مـن المسـتحيل لمجموعـة مـن الكتـل في الفضـاء أن تبقـى سـاكنة إلى الأبـد. إن جاذبيتهـا المتبادلـة سـتؤدي في النهايـة إلى أن تنهـار إلى نحـو الداخـل، في تعـارض واضـح مـع الكـون الاسـتاتيكي. إن حقيقـة عـدم اتسـاق نسـبية آينشـتاين مـع صـورة الكـون آنـذاك قـد شـكلت ضربـة قويـة أكـثر مـما تتخيـل.

ولم يـدم طويـلاً هـذا الخـلاف، فالجميـع يعـرف الآن بـأن الكـون ليـس اسـتاتيكياً بـل آخـذ بالاتسـاع، وأن هـذا التوسـع بـدأ في حـرارة كبـيرة جـداً منـذ حـوالي ١٣,٧٢ مليـار سـنة مضـت. وبنفـس القـدر مـن الأهميـة نعـرف أن مجرتنـا هـي مجـرة مـن حـوالي ٤٠٠ مليـار مجـرة في الكـون المـرئي. نحـن مثـل صنـاع الخرائـط الأرضيـة الأوائـل، توّنـا قـد بدأنـا برسـم خريطـة كاملـة للكـون بأكـبر المقاييـس. فـلا عجـب أن العقـود الأخـيرة شـهدت تغـيرات ثوريـة في صورتنـا للكـون

ولهذا الاكتشاف مدلولات عميقة فلسفية ودينية، لأنه يقترح بدايةً للكون، والبداية توحي بالخلق، والخلق يثير العواطف.

أول من قدّم فكرة الانفجار الكبير كان الفيزيائي والقسّ البلجيكي جورج لوميتر. ففي عام ١٩٢٧ حل لوميتر معادلات آينشتاين للنسبية العامة، وأثبت أن النظرية تتوقع كوناً غير استاتيكي، وفي الواقع تقترح أن كوننا آخذ بالاتساع. وفي عام ١٩٣٠ اقترح كذلك أن كوننا المتوسع، قد بدأ فعلياً كنقطة متناهية الصغر، أطلق عليها (الذرة الأوليّة Primeval Atom).

وقد قدمت ملاحظات إدوين هابل دليلاً على تمدد الكون، في عام ١٩٢٥ باستخدام تلسكوب هوكر Hooker البالغ قطره ١٠٠ إنش، الذي يعتبر أضخم تلسكوب حينها _للمقارنة، نبني اليوم تلسكوباً قطره عشرة أضعاف قطر تلسكوب هوكر ومساحته مائة ضعف_ استطاع العلماء تمييز صور غير واضحة لأجسام لم تكن نجوماً في مجرتنا. فأطلقوا عليها (السُّدُم nebulae) وهي الكلمة اللاتينية لـ شيء غير واضح (في الواقع سحابة)، وناقشوا ما إذا كانت هذه الأشياء في مجرتنا أو خارجها. وبما أن النظرة السائدة كانت حينها بأن مجرتنا هي كل الموجود، فقد سقط معظم علماء الفلك في معسكر (مجرتنا) بقيادة عالم الفلك الشهير هارلو شابلي من جامعة هارفارد.

في يوم رأس السنة الميلادية لعام ١٩٢٥، نشر هابل نتائج دراسته التي استمرت لعامين حول ما يسمى السدم الحلزونية spiral nebulae، حيث كان قادراً على تحديد نوع معين من النجم المتغير variable star في هذه السدم _بما فيها السديم المعروف الآن باسم أندروميدا_ أسماه بالنجم المتغير القيفاوي Cepheid variable star.

رُصدت المتغيرات القيفاوية لأول مرة في عام ١٧٨٤، وهي نجوم يتغير لمعانها خلال فترات منتظمة. وفي عام ١٩٠٨، عُيّنت سوان ليفيت Swan Leavitt بوظيفة كمبيوتر في مرصد جامعة هارفارد. (وظيفة كمبيوتر كانت هي تعيين النساء لفهرسة سطوع النجوم المسجلة على أطباق المرصد الفوتوغرافية؛ لم يُسمح للنساء باستخدام تلسكوبات المرصد في ذلك الوقت). قامت ليفيت باكتشاف مذهل، وأضاءت عليه أكثر عام ١٩١٢، حيث لاحظت أن هناك علاقة منتظمة بين سطوع النجوم القيفاوية وفترة تغيرها. لذلك، إذا أمكننا تحديد المسافة إلى أحد النجوم القيفاوية التي عُرفت فترة تغير سطوعها (تم تحديدها لاحقاً عام ١٩١٣)، ثم قياس سطوع نجوم قيفاوية أخرى لها نفس فترة تغير السطوع سيسمح لنا بتحديد المسافة إلى هذه النجوم. أحدث اكتشاف ليفيت ثورة في حقل علم الفلك.

كان هابل قادراً على استخدام مقياسه للنجوم القيفاوية والعلاقة بين اللمعان والفترة الزمنية لليفيت ليثبت بشكل قاطع بأن النجوم القيفاوية في أندروميدا والعديد من السدم الأخرى أبعد من أن تكون داخل مجرة درب التبانة.

تـم اكتشـاف أن أندروميـدا عـالم آخـر، مجـرة أخـرى حلزونيـة متطابقـة تقريبـاً مـع مجرتنـا، وواحدة مـن أكـثر مـن ١٠٠ مليـار مجـرة أخـرى نعلـم الآن أنهـا موجـودة في كوننـا المـرئي. وكانـت نتائـج هابـل واضحـة بمـا فيـه الكفايـة حتـى تقبـل المجتمـع العلمـي _بمـا في ذلـك هارلـو شـابلي_ حقيقـة أن درب التبانـة ليسـت كل شيء حولنـا.

كان هابـل يسـعى وراء سـمكة أكـبر، أو في هـذه الحالـة، مجـرات أكـبر. عـن طريـق قيـاس النجـوم القيفاويـة الأكـثر خفوتـاً في المجـرات الأبعـد، فـكان قـادراً عـلى رسـم خريطـة الكـون بمقاييـس أكـبر مـن أي وقـت مـضى. وعندمـا قـام بذلـك، اكتشـف شـيئاً آخـر كان أكـثر مـن رائـع: الكـون يتوسـع!

حقـق هابـل نتائجـه هـذه بمقارنـة مسـافات المجـرات التـي قاسـها بمجموعـة مختلفـة من القياسـات مـن عـالم فلـك أمريـكي آخـر، فيسـتو سـليفر، الـذي قـاس أطيـاف الضـوء القادمـة مـن هـذه المجـرات. وفهـم وجـود وطبيعـة هـذه الأطيـاف يتطلـب أن نذهـب إلى بدايـات علـم الفلـك الحديـث.

أحـد أهـم اكتشـافات علـم الفلـك هـو تشـابه مـادة النجـم ومـادة الأرض إلى حـد كبـير. بـدأ الأمـر _ كـما بـدأ الكثـير مـن الأشـياء في العلـم الحديـث_ مـع إسـحاق نيوتـن. في عـام ١٦٦٥، مـرّر حزمـةً رقيقـةً مـن أشـعة الشـمس مـن خـلال ثقـب في النافـذة _بعـد أن أظلـم غرفتـه_ عـبر موشـور ورأى أشـعة الشـمس تتفـرق في ألـوان مـن قـوس قـزح. فاسـتنتج أن الضـوء الأبيـض مـن الشـمس يحتـوي عـلى كل هـذه الألـوان، وقـد كان محقـاً. وبعـد ١٥٠ عامـاً، قـام عـالم آخـر بفحـص الضـوء المشـتت بعنايـة أكـبر، واكتشـف حزمـات مظلمـة وسـط الألـوان، فأرجـع ذلـك إلى مـواد في الغـلاف الخارجـي للشـمس تقـوم بامتصـاص ضـوء بعـض الألـوان أو الأطـوال الموجيـة المحـددة. ويمكـن تحديـد (خطـوط الامتصـاص absorption lines) هـذه _كـما أصبحـت معروفـة_ بأطـوال موجـات الضـوء المُقاسـة المُمتصّة بواسـطة مـواد معروفـة عـلى الأرض، بمـا في ذلـك الهيدروجـين والأكسـجين والحديـد والصوديـوم والكالسـيوم.

في عـام ١٨٦٨، لاحـظ عـالم آخـر خطّـي امتصـاص جديديـن في الجـزء الأصفـر مـن الطيـف الشـمسي التـي لا تتوافـق مـع أي عنـصر معـروف عـلى الأرض. وقـرر أن هـذا يجـب أن يكـون بسـبب عنـصر جديـد، ودعـاه الهليـوم. وبعـد جيـل، اكتُشـف الهليـوم عـلى الأرض. إن النظـر إلى طيـف الإشـعاع القـادم مـن النجـوم الأخـرى هـو أداة علميـة مهمـة لفهـم تكوينهـا ودرجـة حرارتهـا وتطورهـا. وابتـداءً مـن عـام ١٩١٢، لاحـظ سـليفر أطيـاف الضـوء القادمـة مـن مختلـف السـدم الحلزونيـة ووجـد أن الأطيـاف كانـت مماثلـة لتلـك التـي مـن النجـوم القريبـة، إلا أن جميـع خطـوط الامتصـاص انحرفـت بنفـس المقـدار في الطـول الموجـي.

كانـت هـذه الظاهـرة معروفـة آنـذاك بأثـر دوبلـر Doppler effect، الـذي سـمي باسـم الفيزيـائي النمسـاوي كريسـتيان دوبلـر، الـذي أوضـح في عـام ١٨٤٢ أن الموجـات القادمـة نحـوك مـن مصـدر متحـرك سـوف تمـدد إذا كان المصـدر يبتعـد عنـك وتتكثـف إذا كان يتحـرك نحـوك.

وتبين أن نفس الظاهرة تحدث لموجات الضوء كما لموجات الصوت، وإن كانت الأسباب مختلفة إلى حد ما. موجات الضوء من مصدر يتحرك بعيداً عنك سوف تتمدد إما بسبب حركتها الموضعية أو بسبب التوسع في الفضاء المتداخل، وبالتالي تبدو أكثر احمراراً مما لو كانت عكس ذلك، لأن الأحمر هو نهاية طول موجة طويلة من الطيف المرئي، في حين ستتكثف الموجات الصادرة من مصدر يتحرك نحوك وستبدو أكثر زرقةً.

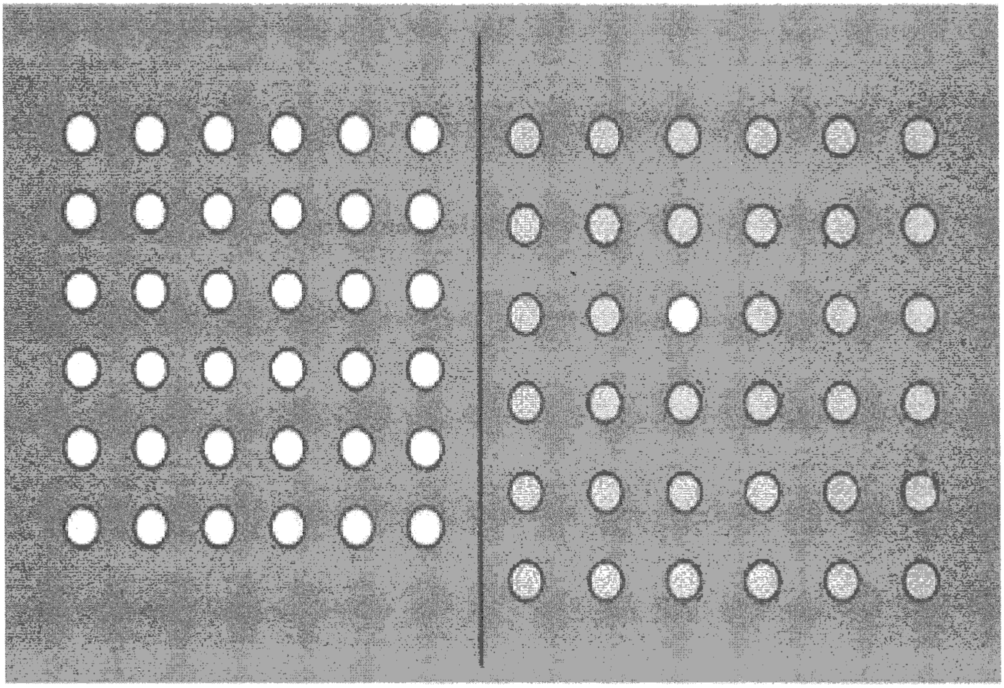
لاحظ سليفر في عام ١٩١٢ أن خطوط الامتصاص من الضوء القادم من جميع السدم الحلزونية انحرفت كلها تقريباً بشكل منظم نحو أطوال موجية أطول (على الرغم من أن بعضها، مثل أندروميدا، انحرفت نحو موجات أقصر). واستنتج بشكل صحيح أن معظم هذه الأجسام كانت تبتعد عنا بسرعات كبيرة.

تمكّن هابل من مقارنة ملاحظاته عن المسافة بين المجرات الحلزونية (كما هي معروفة الآن) مع قياسات سليفر للسرعات التي تتحرك بها بعيداً. وفي عام ١٩٢٩، بمساعدة ملتون هيومَسون، أعلن عن اكتشاف علاقة تجريبية رائعة، تسمى الآن قانون هابل: هناك علاقة خطية بين سرعة الابتعاد والمسافة بين المجرات، وهي أن المجرات الأكثر بعداً عنا تتحرك مبتعدةً بشكل أسرع.

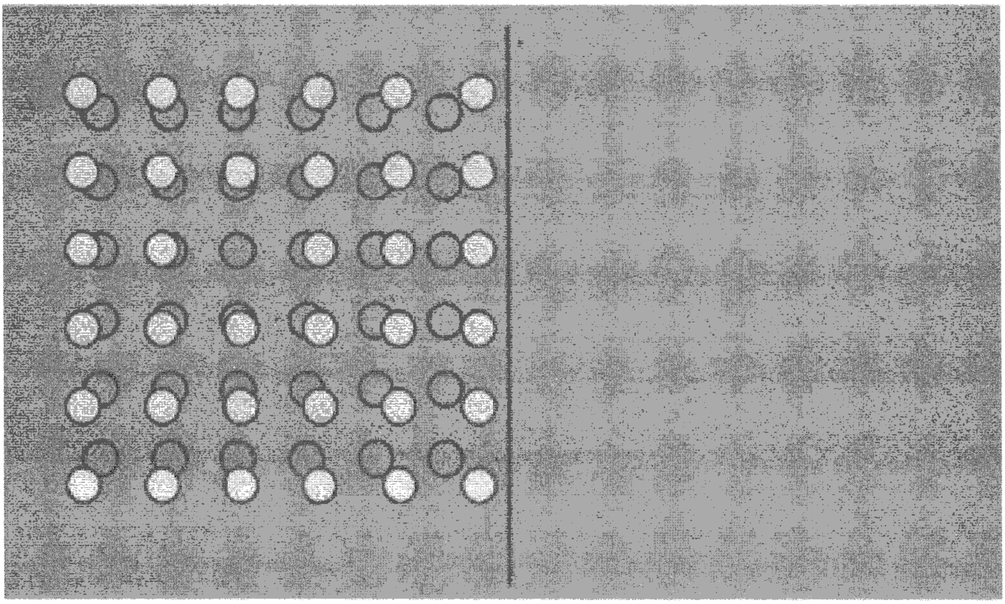
عندما عُرضت هذه الحقيقة الرائعة لأول مرة، وهي أن جميع المجرات تقريباً تتحرك بعيداً عنا، وتلك الأبعد عنا مرتين تبتعد أسرع بمرتين، والأبعد ثلاث مرات تبتعد أسرع بثلاث مرات، وهكذا، فبدا معنى هذا أننا مركز الكون. وجاء هذا متسقاً مع العلاقة التي توقعها لوميتر تحديداً، إن كوننا يتسع فعلاً.

لا أعتقد أن هناك طريقة جيدة لشرح ذلك إلا إذا بدأت تفكر خارج الصندوق، في هذه الحالة خارج صندوق الكون. لنرى ما يتضمنه قانون هابل، نحتاج للنظر إلى الكون من الخارج بدلاً من النظر من موقع المراقب قصير النظر. في حين أنه من الصعب الوقوف خارج الكون ثلاثي الأبعاد، فمن السهل الوقوف خارج كون ثنائي الأبعاد. وهذه صورة لكون متمدد في زمنين مختلفين، حيث تبدو المجرات أبعد عن بعضها في الزمن الثاني.

تخيل الآن أنك تعيش في واحدة من هذه المجرات في الزمن الثاني والتي سنميزها باللون الأبيض.

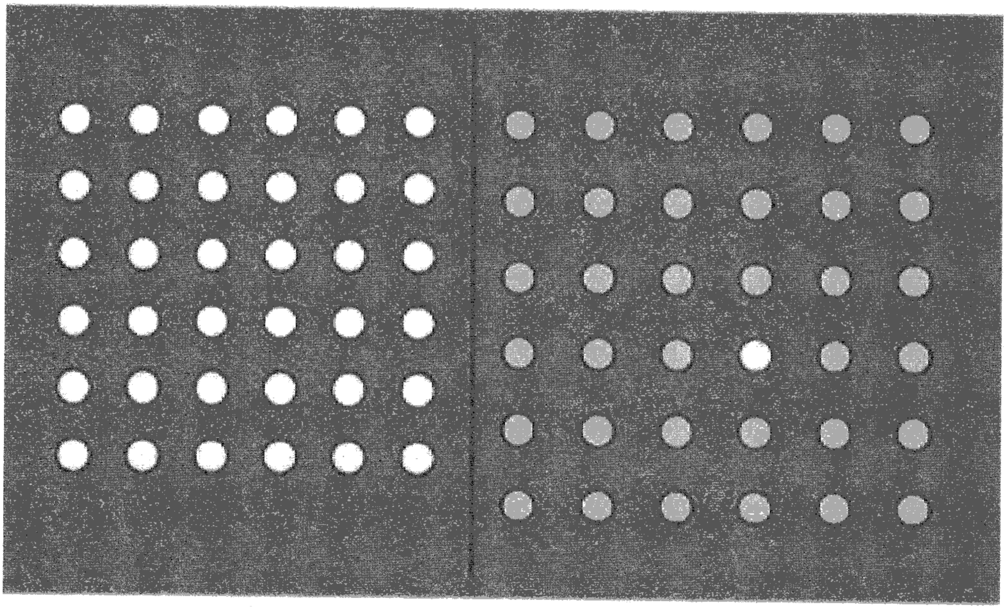


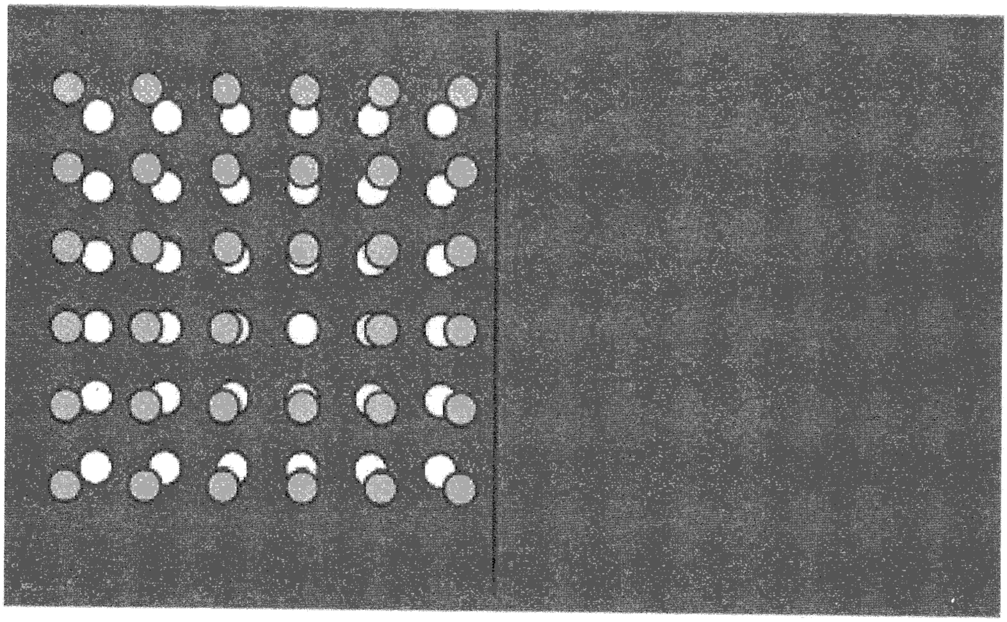
لنرى كيف سيكون تطور الكون من وجهة نظر هذه المجرة، وهنا فقط وضعنا الصورة اليمنى على الصورة اليسرى حيث تكون المجرة البيضاء فوق نفسها.



وها هي ذي! من وجهة نظر المجرة هذه كل المجرات الأخرى تتحرك مبتعدةً، وتلك الأبعد بضعف المسافة تتحرك بضعف المسافة في نفس الوقت، والأبعد بثلاثة أضعاف المسافة تتحرك ثلاثة أضعاف المسافة، وهكذا. ولطالما لا توجد حافة، فإن الذين على المجرة سيشعرون كأنهم مركز التوسع.

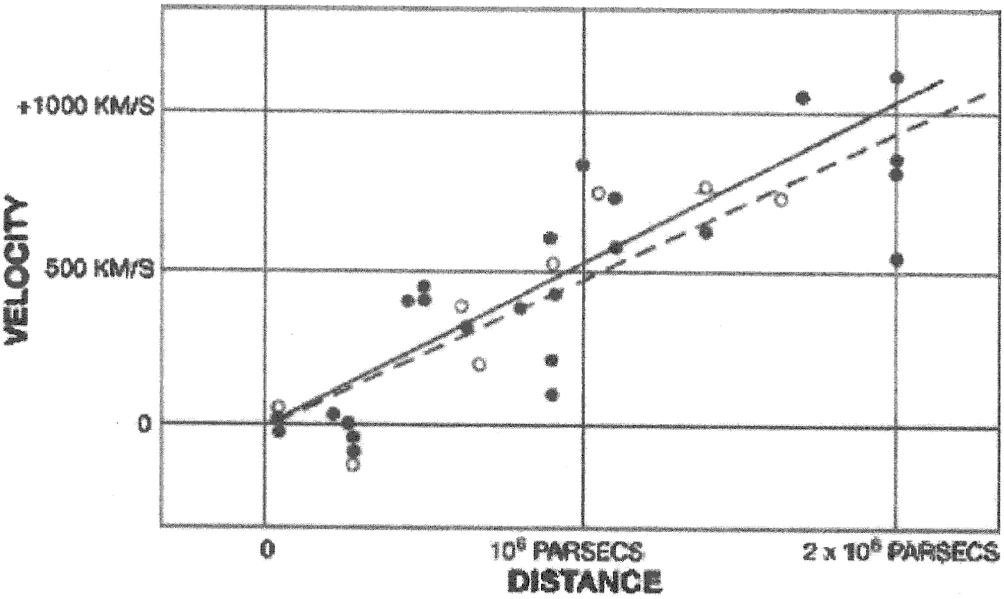
لا يهم أيّ مجرة تختارها الشخص، اختر مجرة أخرى، وكرر:





بالاعتماد على منظورك، إما أن يكون كل مكان هو مركز الكون، أو لا يوجد مكان هو كذلك. هذا لا يهم، فقانون هابل يتسق مع كون يتوسع.

عندما نشر هابل وهيومَسون تحليلهما أول مرة في عام ١٩٢٩، لم ينشرا فقط علاقة خطية بين المسافة والسرعة، ولكن أيضاً أعطوا تقديراً كمياً لمعدل التوسع نفسه. وفيما يلي البيانات المقدَّمة في ذلك الوقت:



كـما تـرى، فـإن تخمـين هابـل بملاءمـة الخـط المسـتقيم لمجموعـة البيانـات هـذه يبـدو محظوظـاً نسـبياً، (ومـن الواضـح أن هنـاك علاقـة مـا، لكـن ملاءمـة الخـط المسـتقيم ليسـت واضحـة عـلى أسـاس هـذه البيانـات وحدهـا). فمعـدل التوسـع الـذي حصلـوا عليـه يشـير إلى أن المجـرة التـي تبعـد مليـون فرسـخ (ثلاثـة ملايـين سـنة ضوئيـة) _متوسـط الفصـل بـين المجـرات_ يبتعـد عنـا بسرعـة ٥٠٠ كم/ثـا. لكـن تقديرهـم هـذا لم يكـن محظوظـاً جـداً، والسـبب في ذلـك بسـيط نسـبياً لـيُرى. فـإذا كان كل شيء يتحـرك بعيـداً اليـوم، فإنـه كان أقـرب إلى بعضـه في الأوقـات السـابقة. الآن، إذا كانـت الجاذبيـة قـوة جـذب، فيجـب أن تُبطـئ توسـع الكـون. وهـذا يعنـي أن المجـرة التـي نراهـا تبتعـد عنـا مسـافة ٥٠٠ كم/ثـا اليـوم، كانـت سـتتحرك بشـكل أسرع في وقـت أبكـر.

وإذا افترضنـا للحظـة بـأن المجـرة كانـت دائمـاً تحمـل هـذه السرعـة، يمكننـا العمـل رجوعـاً، ومعرفـة متـى كانـت في نفـس موقـع مجرتنـا. وبمـا أن المجـرات البعيـدة ضعـف المسـافة تتحـرك بضعـف السرعـة. بالعمـل إلى الـوراء نجـد أنهـا تتركـب في موقعنـا في نفـس الوقـت بالضبـط. بالفعـل، فـإن الكـون المـرئي كلـه كان متراكبـاً في نقطـة واحـدة _الانفجـار الكبيـر_ في وقـت يمكننـا تقديـره بهـذه الطريقـة.

ومـن الواضـح أن مثـل هـذا التقديـر هـو الحـد الأعـلى لعمـر الكـون، لأنـه إذا كانـت المجـرات تتحـرك بشـكل أسرع، لوصلـت إلى مكانهـا اليـوم في وقـت أقـل مـما يقترحـه هـذا التقديـر.

ومـن هـذا التقديـر المؤسـس عـلى تحليـل هابـل، فقـد حـدث الانفجـار الكبيـر قبـل حـوالي ١,٥ مليـار سـنة. وحتـى في عـام ١٩٢٩ كانـت الأدلـة واضحـة بالفعـل عـلى أن عمـر الأرض كان أكـبر مـن ٣ مليـارات سـنة، مـما يشـير إلى وجـود خطـأ مـا في التحليـل.

وكان مصدر هـذا الارتبـاك حقيقـةً هـو أن تقديـرات المسـافة لهابـل، المستمدة باسـتخدام العلاقـات القيفاويـة في مجرتنـا، كانـت غـير صحيحـة منهجيـاً. فسـلم المسـافة المؤسـس عـلى اسـتخدام النجـوم القيفاويـة القريبـة لتقديـر مسـافة النجـوم القيفاويـة الأبعـد، ومـن ثـم لتقديـر المسـافة إلى المجـرات التـي رُصدت فيهـا نجـوم قيفاويـة أبعـد، كان فيـه خلـل. وتاريـخ كيفيـة التغلـب عـلى هـذه الآثـار المنهجيـة طويـل جـداً ومعقـد لوصفـه هنـا، وعـلى أي حـال فإنـه لا يهـم فلدينـا الآن مُقَـدِّر مسـافة أفضـل بكثـير.

واحدة من الصور المفضلة لدي لتلسكوب هابل الفضائي:

تظهـر في الصـورة مجـرة حلزونيـة بعيـدة جـداً، منـذ زمـن بعيـد (لأن الضـوء الخـارج مـن المجـرة يأخـذ بعـض الوقـت _أكـثر مـن ٥٠ مليـون سـنة_ ليصـل إلينـا). مجـرة حلزونيـة كهـذه _المشـابهة لمجرتنـا_ تحتـوي عـلى حـوالي ١٠٠ مليـار نجـم داخلهـا. وقـد تحـوي النـواة المشرقـة في وسـطها عـلى حـوالي ١٠ مليـارات نجـم. لاحـظ النجـم السـاطع عـلى الزاويـة اليـسرى مـن الأسـفل. قـد تفـترض بـأن هـذا النجـم قريـب في مجرتنـا ظهـر في طريـق الصـورة. لكـن في الواقـع، هـو نجـم في نفـس المجـرة البعيـدة أكـثر مـن ٥٠ مليـون سـنة ضوئيـة.

مـن الواضـح أنـه ليـس نجـم عـادي. إنـه نجـم انفجـر للتـو، المسـتعِر الأعظـم supernova وهـو أحـد أسـطع الألعـاب الناريـة في الكـون. عندمـا ينفجـر نجـم يـضيء لفـترة وجيـزة (حـوالي شـهر أو نحـو ذلـك) بضـوء مـرئي وسـطوع ١٠ مليـارات نجـم.

اتضح أن هناك نوعاً معيناً من النجوم المتفجرة، يدعى المستعر الأعظم ١a. الذي أظهرت دراسات دقيقة على مدى تسعينيات القرن الماضي أن لهذا المستعر خصائص رائعة: بدقة عالية، المستعر الذي يشع أكثر داخلياً يشع لفترة أطول. إن هذا الارتباط غير المفهوم بشكل كامل نظرياً، والمتماسك جداً تجريبياً. يعني أن هذه المستعرات العظمى جيدة جداً كشموع قياسية standard candles. ومعنى ذلك أن هذه المستعرات العظمى يمكن أن تستخدم لمعايرة المسافات لأن سطوعها الداخلي يمكن التحقق منه مباشرة بواسطة قياس مستقل عن بعدها. فإذا رصدنا مستعراً أعظم يمكننا استنتاج سطوعه الداخلي عن طريق رصد المدة التي يشع فيها. ثم، بقياس سطوعه الخارجي بالتلسكوب، يمكننا استنتاج مدى بعد النجم المستعر والمجرة المضيفة له بدقة. وبقياس انزياح الضوء نحو الأحمر redshift لضوء النجوم من المجرة، يمكنا تحديد سرعتها، وبالتالي يمكن مقارنة السرعة مع المسافة واستنتاج معدل التوسع في الكون.

حتى الآن تبدو الأمور جيدة، ولكن إذا انفجرت المستعرات العظمى مرة واحدة فقط كل مائة سنة أو نحو ذلك في المجرة، ما هو احتمال رؤيتنا لواحد منها؟ وآخر مستعر أعظم في مجرتنا شوهد على الأرض كان قد رآه يوهان كبلر في عام ١٦٠٤!

أما في الوقت الحاضر، إحدى الطرق لرؤية مستعر أعظم هي ببساطة عن طريق تعيين خريج جامعي مختلف لكل مجرة في السماء.

اخرج في ليلة ما إلى الغابة أو الصحراء حيث يمكنك رؤية النجوم، وارفع يدك إلى السماء واصنع دائرة صغيرة بين الإبهام والسبابة. ارفعها إلى بقعة مظلمة حيث لا توجد نجوم مرئية. في تلك البقعة الداكنة، مع تلسكوب كبير بما فيه الكفاية كالذي لدينا اليوم، يمكن ملاحظة حوالي ١٠٠ ألف مجرة، كل منها يحتوي على مليارات النجوم. وبما أن المستعر الأعظم ينفجر مرة واحدة لكل مائة سنة لكل مجرة، فمع ١٠٠ ألف مجرة في المشهد، يجب أن تتوقع ـ وسطياً ـ رؤية حوالي ثلاثة نجوم تنفجر في ليلة معينة.

يقوم علماء الفلك بالتسجيل على وقت لاستعمال التلسكوب، وفي بعض الليالي قد يرون نجماً ينفجر، وفي ليالٍ أخرى نجمان، وبعض الليالي قد تكون غائمة وقد لا يرون شيئاً. وبهذه الطريقة تمكنت عدة مجموعات من تحديد ثابت هابل مع عدم يقين بأقل من ١٠٪. ويبلغ العدد الجديد حوالي ٧٠ كم/ثا للمجرات البعيدة ٣ ملايين سنة ضوئية في المتوسط، وهذا تقريباً عُشر العدد المستمد من هابل وهيومَسون. ونتيجةً لذلك، نستنتج أن عمر الكون يقترب من ١٣ مليار سنة، بدلاً من ١,٥ مليار سنة. وهذا يتفق بشكل كامل مع تقديرات مستقلة لعمر أقدم النجوم في مجرتنا. من براه إلى كبلر، من لوميتر إلى أينشتاين وهابل، ومن أطياف النجوم إلى وفرة عناصر الضوء، أربعمئة عام من العلوم الحديثة أنتجت لنا صورة رائعة ومتسقة للكون المتوسع.

قصة غموض كونيّة: وزن الكون

وبعد أن أثبت أن للكون بداية، وأن تلك البداية كانت فترة محدودة وقابلة للقياس في الماضي، فإن السؤال الطبيعي التالي الذي يطرح نفسه هو: كيف سينتهي؟

خلال السبعينات والثمانينات، أصبح من الواضح بشكل متزايد من القياسات التفصيلية لحركة النجوم والغاز في مجرتنا، وكذلك من حركة المجرات في مجموعات كبيرة من المجرات تسمى عناقيد clusters، أن الكون أكثر تعقيداً بكثير مما تراه العين أو التلسكوب.

الجاذبية هي القوة الرئيسة التي تعمل على مقياس هائل من المجرات، لذلك فإن قياس حركة الأجسام على هذه المقاييس يسمح لنا بالتحقق من جذب الجاذبية الذي يقود هذه الحركة. انطلقت هذه القياسات مع العمل الرائد للفيزيائية الأمريكية فيرا روبن وزملاؤها في أوائل السبعينيات. وكانت روبن ثاني امرأة تُمنح الميدالية الذهبية للجمعية الملكية الفلكية. تلك الجائزة والعديد من التكريمات المُستحقّة نالتها نتيجة قياساتها الرائدة لمعدل دوران مجرتنا. من خلال مراقبة النجوم والغاز الساخن دائمي البعد عن مركز مجرتنا، حتّمت أن هذه المناطق كانت تسير أسرع بكثير مما كان ينبغي أن يكون لو كانت قوة الجاذبية التي تقود حركتها تنشأ عن كتلة جميع الأجسام المرئية داخل المجرة. بسبب عملها، أصبح واضحاً في النهاية لعلماء الكون أن السبيل الوحيدة لشرح هذه الحركة هي بوجود كتلة أكبر بكثير في مجرتنا مما يمكن حسابه عن طريق إضافة كتلة الغاز الساخن والنجوم.

لكن كان هناك مشكلة في هذا الرأي، فالحسابات نفسها التي تفسر بشكل جميل الوفرة المرئية لعناصر الضوء (الهيدروجين، والهيليوم، والليثيوم) في الكون تخبرنا أيضاً بشكل أو بآخر عن عدد البروتونات والنيوترونات _وهي مواد المادة العادية_ التي يجب أن توجد في الكون. ويرجع ذلك إلى أنه مثل أي وصفة طهي _في هذه الحالة الطهي النووي_ كمية المنتج النهائي تعتمد على مقدار كل عنصر تبدأ به، فإذا ضاعفت الوصفة ستحصل على المزيد من المنتج النهائي.

مع ذلك، الكثافة الأولية للبروتونات والنيوترونات الناشئة عن الانفجار الكبير، كما تحددها الملائمة مع الوفرة المرئية من الهيدروجين، الهيليوم، والليثيوم، تمثل حوالي ضعف كمية المواد التي يمكن رؤيتها في النجوم والغاز الساخن، أين هي تلك الجسيمات؟

من السهل تصور طرق لإخفاء البروتونات والنيوترونات (كرات الثلج والكواكب وعلماء الكون... أي منهم لا يشرق)، لذا توقع الكثير من الفيزيائيين أن العديد من البروتونات والنيوترونات تكمن في أجسام معتمة كما الأشياء المرئية بنفس الكمية. ومع ذلك، فعندما نضيف مقدار المادة

المعتمة التي يجب أن تكون موجودة لشرح حركة المواد في مجرتنا، نجد أن نسبة مجموع المادة إلى المادة المرئية ليست ٢ إلى ١، ولكن أقرب إلى ١٠ إلى ١. إذا لم يكن هذا خطأً، فإن المادة المعتمة لا يمكن أن تكون مصنوعة من البروتونات والنيوترونات. ليس هناك ما يكفي منها.

إن احتمال وجود مادة معتمة غريبة مثير للغاية. كان يعني ضمناً أن الجسيمات المهيمنة في الكون لم تكن بروتونات ونيوترونات، ولكن ربما نوع جديد من الجسيمات الأولية، شيء ما غامض يتدفق بين النجوم وخلالها ويدير بصمت عرض الجاذبية بأكمله الذي نسميه مجرة.

والأكثر إثارة أن هذا ينطوي على ثلاثة خطوط جديدة من البحوث التي يمكن أن تعيد بشكل أساسي إنارة طبيعة الواقع.

إذا تكوّنت هذه الجسيمات في الانفجار الكبير _مثل عناصر الضوء التي شرحناها_ يجب أن نكون قادرين على استخدام الأفكار حول القوى التي تحكم تفاعلات الجسيمات الأولية (بدلاً من التفاعلات النووية المتعلقة بتحديد وفرة العنصر) لتقدير وفرة الجسيمات الجديدة الغريبة المحتملة في الكون اليوم.

قد يكون من الممكن استنتاج الوفرة الكلية للمادة المعتمة في الكون على أساس الأفكار النظرية في فيزياء الجسيمات، أو قد يكون من الممكن اقتراح تجارب جديدة للكشف عن المادة المعتمة. وقد تخبرنا أي من الطريقتين عن كمية المادة الكلية، وبالتالي تخبرنا عما هي هندسة كوننا. وظيفة الفيزياء ليست اختراع الأشياء التي لا يمكننا رؤيتها لشرح الأشياء التي يمكننا رؤيتها، بل معرفة كيفية رؤية ما لا نستطيع رؤيته، لنرى ما كان غير مرئي في السابق، المجهول المعلوم.

إذا أمكننا تحديد طبيعة المادة المظلمة، ووفرتها، فسنكون قادرين على تحديد الكيفية التي سينتهي بها الكون.

يبدو هذا الاحتمال الأخير الأكثر إثارةً من كل شيء، لذلك سنبدأ معه.

عندما وضع أينشتاين نظريته النسبية العامة، في لب هذه النظرية كان احتمال أن ينحني الفضاء في وجود المادة أو الطاقة. هذه الفكرة النظرية أصبحت أكثر من مجرد تكهنات في عام ١٩١٩ عندما لاحظت بعثتين تقوس النجوم حول الشمس خلال كسوفها في الدرجة التي تنبأ أينشتاين بها بالضبط إذا كان وجود الشمس يحني الفضاء من حولها.

الآن، إذا كان الفضاء يحتمل أن يكون منحني، فإن هندسة كوننا كله تصبح أكثر إثارة للاهتمام. اعتماداً على الكمية الكلية للمادة في كوننا، يمكن أن يوجد الكون في واحد من ثلاثة أنواع مختلفة من الهندسة، ما يسمى مفتوح Open، مغلق Closed، أو مسطح Flat.

بالإضافة أنه إذا كان الانحناء صغيراً جداً، فمن الصعب أن نتصور كيف يمكن للمرء أن يكشف ذلك في الحياة اليومية، تماماً كما شَعر الكثير من الناس _خلال العصور الوسطى على الأقل_ بأن الأرض مسطحة لأنه بدت كذلك من منظورهم.

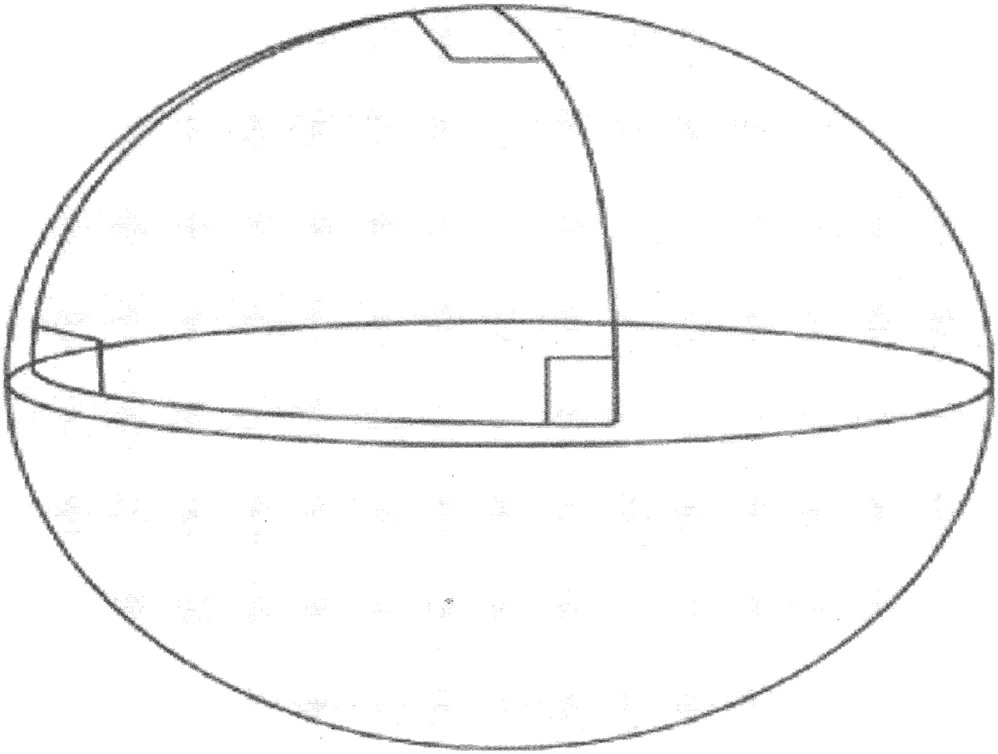
إن النسبية العامة تخبرنا بشكل لا لبس فيه بأن الكون المغلق الذي تهيمن على كثافة الطاقة فيه المادة مثل النجوم والمجرات، وحتى المادة المعتمة، يجب أن ينهار في عملية عكسية للانفجار الكبير تسمى الانسحاق الكبير Big Crunch. والكون المفتوح سيستمر في التوسع إلى الأبد بمعدل محدود. والكون المسطح فهو على الحدود بين الاثنين، حيث سيتباطأ ولكنه لن يتوقف أبداً. وقد حدّدت الملاحظات أننا نعيش في عالم مفتوح، يمكن أن يتوسع إلى الأبد. أو هل حدّدت؟

ضوء من بداية الزمن

إذا فكرت في ذلك، محاولاً تحديد صافي انحناء الكون عن طريق قياس الكتلة الإجمالية التي يحتويها ومن ثم استخدام معادلات النسبية العامة للعمل عكسياً إلى الوراء ستجد مشاكل محتملة. حتماً، عليك أن تتساءل عما إذا كانت المادة مخفية بطرق لا يمكننا الكشف عنها. على سبيل المثال، يمكننا فقط التحقق من وجود المادة داخل هذه الأنظمة باستخدام ديناميات الجاذبية للأنظمة المرئية مثل المجرات والعناقيد المجرية. إذا كانت كتلة كبيرة تسكن بطريقة أو بأخرى في مكان ما، فقد تفوتنا. فسيكون من الأفضل بكثير قياس هندسة الكون المرئي كله مباشرةً.

ولكن كيف يمكنك قياس الهندسة ثلاثية الأبعاد للكون المرئي كله؟ من الأسهل أن نبدأ بسؤال أبسط: كيف يمكنك تحديد ما إذا كان جسم ثنائي الأبعاد مثل سطح الأرض منحنٍ إذا لم تتمكن من الذهاب حول الأرض أو الذهاب فوقه على قمر صناعي والنظر إلى الأسفل؟

أولاً، يمكنك أن تسأل طالب ثانوية: ما هو مجموع زوايا المثلث؟ سيقول لك ١٨٠ درجة، لأن الطالب بلا شك قد تعلم الهندسة الإقليدية وهي الهندسة المرتبطة بقِطع الورق المسطحة. على سطح منحني ثنائي الأبعاد مثل الكرة الأرضية، يمكنك رسم مثلث مجموع زواياه أكبر بكثير من ١٨٠ درجة. على سبيل المثال، فكر في رسم خط على طول خط الاستواء، ثم اصنع زاوية قائمة تصعد إلى القطب الشمالي، ثم زاوية قائمة أخرى عائدةً إلى خط الاستواء، كما هو موضح أدناه. ٣ × ٩٠ = ٢٧٠، أكبر بكثير من ١٨٠ درجة.



وتبين أن هذا التفكير البسيط ثنائي الأبعاد يمتد بشكل مباشر ومتماثل إلى ثلاثة أبعاد، لأن علماء الرياضيات الذين اقترحوا أولاً هندسة غير مسطحة أو كما تسمى غير إقليدية، أدركوا أن نفس الاحتمالات يمكن أن توجد في ثلاثة أبعاد.

أول من حاول قياس انحناء الفضاء بشكل نهائي هو الرياضي نيكولاي إيفانوفيتش لوباشيفسكي، في الواقع كان واحداً من عالمي رياضيات مجازفين بطباعة إمكانية ما يسمى هندسة منحنى بقطع زائد، حيث يمكن أن تتباعد الخطوط المتوازية. ومن الجدير بالملاحظة أن لوباشيفسكي نشر عمله على الهندسة الزائدية (التي نسميها الآن الأكوان «المنحنية السالبة» أو «المفتوحة») في عام ١٨٣٠.

بعد ذلك بوقت قليل، اقترح لوباشيفسكي بعد النظر فيما إذا كان الكون ثلاثي الأبعاد الخاص بنا قد يكون قطعاً زائداً أنه قد يكون من الممكن البحث في مثلث نجمي على حل تجريبي لهذا السؤال. واقترح أنه يمكن أخذ الملاحظات من نجم الشعرى اليمانية عندما تكون الأرض على أحد جانبي مدارها حول الشمس، كل ستة أشهر على حدى. واستنتج من الملاحظات أن انحناء الكون يجب أن يكون على الأقل ١٦٦ ألف مرة نصف قطر مدار الأرض. وهذا رقم كبير، لكنه صغير على المقاييس الكونية. لسوء الحظ، في حين أن فكرة لوباشيفسكي صحيحة، وقال أنه كانت تكنولوجيا عصره محدودة. لكن بعد مرور مائة وخمسين عاماً، تحسنت الأمور بفضل مجموعة من أكثر الملاحظات أهمية في علم الكونيات: قياسات إشعاع الخلفية الكونية الميكروي،

أو CMBR. وقياسات CMBR لا تقل عن الوهج اللاحق للانفجار الكبير. وهو يقدم دليلاً آخر من الأدلة المباشرة، في حالة الحاجة إلى ذلك، أن الانفجار الكبير حدث حقاً، لأنه يسمح لنا أن ننظر إلى الوراء مباشرة والكشف عن طبيعة الكون المبكر الساخنة جداً، التي ظهرت كل البنى منه لاحقاً.

أصل إشعاع الخلفية الكونية الميكروي مستقيم نسبياً. وبما أن الكون له عمر محدود (١٣,٧٢ مليار سنة)، وبما أننا ننظر إلى أشياء أبعد من أي وقت مضى، فإننا ننظر إلى الزمن رجوعاً (لأن الضوء يستغرق وقتاً أطول للوصول إلينا من هذه الأجسام)، قد تتخيل أنه إذا نظرنا بعيداً بما فيه الكفاية، يمكن أن نرى الانفجار الكبير نفسه. وهذا ليس مستحيلاً من حيث المبدأ، ولكن عملياً، يكمن جدار بيننا وبين هذا الوقت المبكر جداً. ليس جداراً مادياً مثل جدران الغرفة، ولكن واحداً _إلى حد كبير_ له نفس التأثير. لا أستطيع أن أرى ما وراء الجدران في غرفتي لأنها غير شفافة. إنها تمتص الضوء. الآن، وأنا أنظر في السماء إلى الوراء أبعد وأبعد في الزمن، فأنا أنظر إلى الكون كما كان أصغر وأصغر سناً، وأيضاً أسخن وأسخن، لأنه كان يتبرد منذ الانفجار الكبير. إذا نظرنا إلى الوراء بما يكفي، إلى وقت كان عمر الكون فيه حوالي ٣٠٠ ألف سنة، كانت درجة حرارة الكون حوالي ٣٠٠٠ درجة (مقياس كلفن) فوق الصفر المطلق. عند هذه الدرجة من الحرارة كان الإشعاع المحيط نشطاً لدرجة أنه كان قادراً على تفكيك الذرات المهيمنة في الكون، ذرات الهيدروجين، إلى مكوناتها المنفصلة (البروتون والإلكترون). قبل هذا الوقت لم تكن هناك مادة محايدة. تتكون المادة العادية في الكون من نوى ذرية وإلكترونات، تتألف من بلازما كثيفة من الجسيمات المشحونة المتفاعلة مع الإشعاع. غير أن البلازما يمكن أن تكون غير شفافة للإشعاع. فتمتص الجسيمات المشحونة داخل البلازما الفوتونات وتعيد بعثها فيكون الإشعاع غير قادر على المرور بسهولة عبر هذه المواد دون انقطاع. والنتيجة أنه إذا حاولت النظر إلى الوراء في الزمن، لن تستطيع رؤية الماضي لأبعد من الوقت الذي كانت فيه المادة في الكون تتألف من هذه البلازما.

مرة أخرى، مثل جدران الغرفة. أستطيع أن أراها فقط لأن الإلكترونات في الذرات على سطح الجدار تمتص الضوء من المصباح ثم تعيد بعثه، والهواء بيني وبين الجدران شفاف، لذلك أستطيع أن أرى كل الطريق إلى سطح الجدار الذي يبعث الضوء. كذلك هو أيضاً مع الكون. عندما ننظر، نستطيع أن نرى كل الطريق حتى (سطح التشتت الأخير last scattering surface) وهي النقطة التي أصبح فيها الكون محايداً، حيث اتحدت البروتونات مع الالكترونات لتشكل ذرات الهيدروجين متعادلة الشحنة. بعد هذه النقطة، أصبح الكون شفافاً إلى حد كبير للإشعاع، ويمكن الآن أن نشاهد الإشعاع الذي تم امتصاصه وإعادة بعثه من قِبل الإلكترونات بما أن المادة في الكون أصبحت محايدة.

وبناءً على صورة الانفجار الكبير فإنها تتنبأ بأن هناك إشعاع يأتي عليّ من جميع الاتجاهات من سطح التشتت الأخير. وبما أن الكون قد توسع بمعامل يبلغ حوالي ١,٠٠٠ منذ ذلك الوقت،

فقد برد الإشعاع في طريقه إلينا، وهو الآن حوالي ٣ درجات فوق الصفر المطلق. وتلك هي بالضبط الإشارة التي وجدها العالمان قليلا الحظ في ولاية نيوجيرسي في عام ١٩٦٥، واللذان حصلا بسبب اكتشافهما هذا على جائزة نوبل في وقت لاحق.

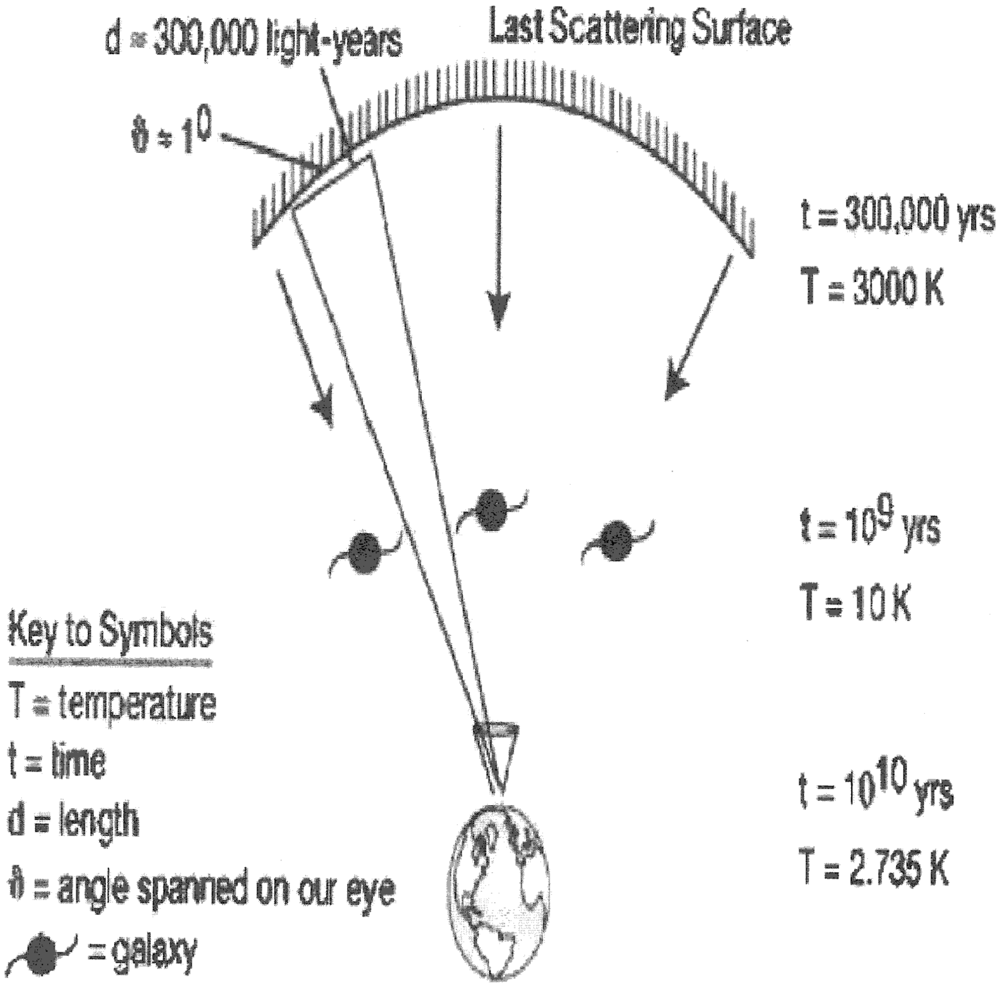
في الواقع، أعطيت جائزة نوبل ثانية مؤخراً لملاحظات إشعاع الخلفية الكونية الميكروية، وذلك لسبب وجيه. فإذا استطعنا التقاط صورة لسطح سطح التشتت الأخير، فإننا سنحصل على صورة لكون حديث الولادة لا يتجاوز عمره الـ ٣٠٠ ألف سنة. ويمكننا رؤية جميع البنى التي من شأنها أن تنهار في يوم ما لتشكل المجرات والنجوم والكواكب وكل البقية. والأهم من ذلك، فإن هذه البنى لم تتأثر بكل التطور الديناميكي اللاحق الذي يمكن أن يحجب الطبيعة الضمنية وأصل أول الاضطرابات البدائية الصغيرة في المادة والطاقة التي من المفترض أن تنشأ عن طريق العمليات في اللحظات الأولى من الانفجار الكبير.

مع ذلك، والأهم بنسبة لهدفنا، أن على هذا السطح سيكون هناك نطاق مميز، والذي لا يدمغه شيء غير الزمن. يمكن فهمه على النحو التالي: إذا افترضنا مسافة تمتد حوالي ١ درجة على سطح التشتت الأخير كما يُرى من قِبل مراقب على الأرض، وهذا يتوافق مع مسافة حوالي ٣٠٠ ألف سنة ضوئية على هذا السطح. الآن، نظراً لأن سطح التشتت الأخير يعكس الوقت الذي كان فيه الكون نفسه حوالي ٣٠٠ ألف سنة، وبما أن أينشتاين يخبرنا أنه لا توجد معلومات يمكن أن تسافر عبر الفضاء أسرع من سرعة الضوء، فهذا يعني أنه لا يمكن لأي إشارة من مكان ما السفر عبر هذا السطح في ذلك الوقت بأكثر من حوالي ٣٠٠ ألف سنة ضوئية.

افترض الآن كتلة من المادة أصغر من ٣٠٠ ألف سنة ضوئية. مثل هذه الكتلة سوف تبدأ بالانهيار على نفسها بسبب جاذبيتها الخاصة. ولكن كتلة أكبر من ٣٠٠ ألف سنة ضوئية لن تبدأ بالانهيار، لأنه حتى الآن هي لا تعلم أنها كتلة. الجاذبية، التي تنتشر بحد ذاتها بسرعة الضوء، لا يمكن أن تسافر عبر كامل الكتلة. لذلك، فإن الكتلة ستبقى هناك، في انتظار أن تنهار عندما يصبح الكون كبيراً بما فيه الكفاية لتعرف ما يفترض أن تفعل!

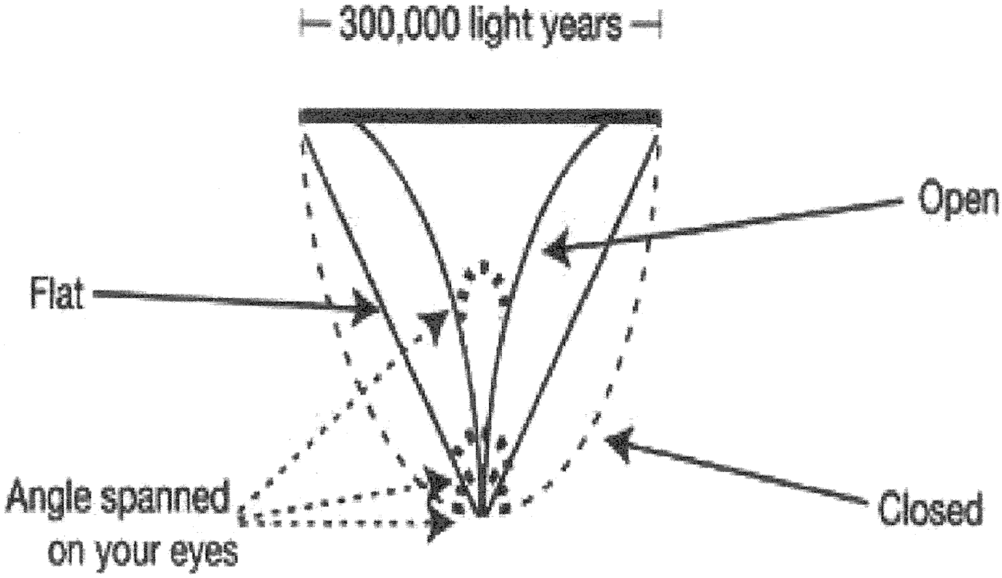
هـذا يعين مثلثاً خاصاً، مع أحد أضلاع ٣٠٠ ألـف سـنة ضوئيـة _وهـي مسـافة معروفـة بعيـدة عنـا_ حددتهـا المسـافة بيننـا وسـطح التشـتت الأخيـر، كـما هـو مبيـن أدنـاه:

أضخـم كتـل المـادة، التـي بـدأت بالانهيـار سـتنتج انحرافـات في صـورة سـطح الخلفيـة الميكـروي، وسـوف تمتـد عـلى هـذا المقيـاس الـزاوي. فـإذا كنـا قادريـن عـلى الحصـول على صـورة مـن هـذا السـطح كـما بـدا في ذلـك الوقـت، فإننـا سـنتوقع أن تكـون هـذه البقـع الحـارّة _في المتوسـط_ أكـبر الكتـل المهمـة التـي نراهـا في الصـورة.



مهـما يكـن، سـواء كانـت الزاويـة الممتـدة لهـذه المسـافة هـي بالضبـط درجـة واحـدة أو لم تكـن، فسـيتم تحديـد ذلـك مـن قِبـل هندسـة الكـون. ففـي الكـون المسـطح، تسـير أشـعة الضـوء في خطـوط مسـتقيمة. في الكـون المفتـوح، تنحنـي أشـعة الشـمس إلى الخـارج إذا مـا تتبعناهـا رجوعـاً بالزمـن. وفي كـون مغلـق، تتقـارب أشـعة الضـوء إذا مـا تتبعناهـا رجوعـاً. وهكـذا، فـإن الزاويـة الفعليـة التـي تمتـد

على أعيننا بمسطرة هي ٣٠٠ ألف سنة ضوئية، وتقع على مسافة مرتبطة مع سطح التشتت الأخير تعتمد على هندسة الكون، كما هو موضح:



وهذا يوفر اختباراً مباشراً وخالياً من العوائق لهندسة الكون. وبما أن حجم أكبر البقع الحارة أو الباردة في صورة إشعاع الخلفية الميكروي يعتمد فقط على السببية _حقيقة أن الجاذبية يمكن أن تنتشر فقط في سرعة الضوء، بالتالي فإن أكبر منطقة يمكن أن تكون انهارت في ذلك الوقت، والتي تُحددها ببساطة أبعد مسافة امتدها شعاع الضوء في ذلك الوقت_ ولأن الزاوية التي نراها تمتد على مسطرة ثابتة على مسافة ثابتة منا يحددها فقط انحناء الكون، فإن صورة بسيطة لسطح التشتت الأخير يمكن أن يكشف لنا هندسة الزمكان على مقياس ضخم.

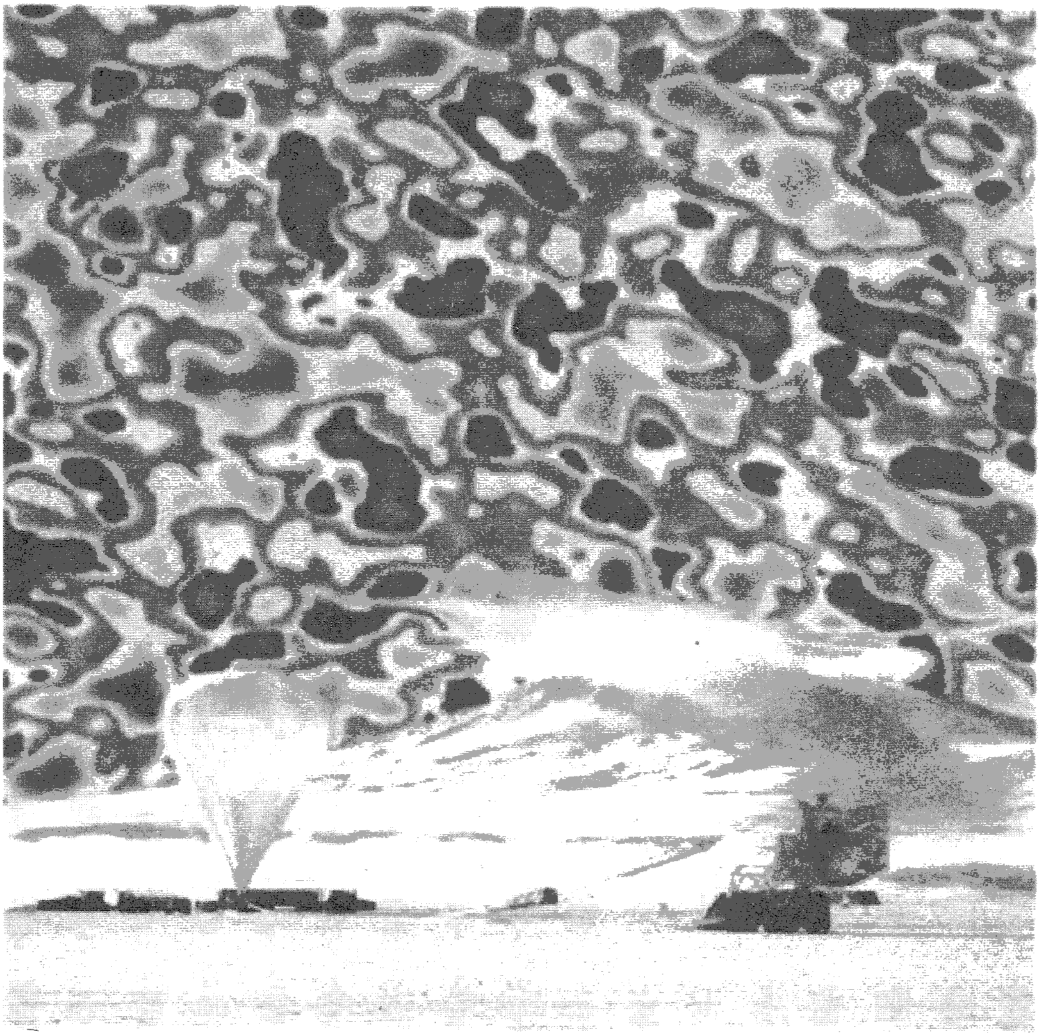
وكانت التجربة الأولى التي تسعى لرصد هذا، تجربة إطلاق منطاد من قارة القطب الجنوبي في عام ١٩٩٧ يدعى بوميرانغ BOOMERANG. بينما يعني هذا الاختصار رصد المنطاد للإشعاع خارج المجرة المليمتري والجيوفيزيائي Balloon Observations of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysics فإن السبب الحقيقي لتسميته بهذا الاسم كان أبسط. تم إرفاق مقياس كثافة الطاقة الإشعاعية الميكروي بمنطاد مرتفع كما هو معروض أدناه:

ثم ذهب المنطاد حول العالم. في الواقع، هو أمر سهل القيام به في القارة القطبية الجنوبية حيث يمكنك أن تدور في دائرة فقط. ومع ذلك، فإن رحلة الدوران هذه استغرقت أسبوعين _بمساعدة الرياح القطبية_ من محطة ماكموردو. وبعد ذلك عاد الجهاز إلى نقطة انطلاقه، ومن هنا اسم بوميرانغ.

وكان الهدف من رحلة المنطاد بسيطاً، وهو للحصول على مشهد لإشعاع الخلفية الميكروي، يعكس درجة حرارة ٣ درجات فوق الصفر المطلق (مقياس كلفن)، غير ملوثة بمواد أكثر سخونة على الأرض (حتى درجات الحرارة في قارة القطب الجنوبي هي أحرّ بأكثر من مائتي درجة من

إشعاع الخلفية الميكروي الكوني)، ونحن نريد الذهاب لأعلى حد ممكن فوق الأرض، وحتى أعلى من الغلاف الجوي للأرض. وبشكل مثالي لهذا الغرض نستخدم الأقمار الصناعية، ولكن المناطيد المرتفعة يمكنها أن تقوم بالكثير من العمل بتكاليف مالية أقل كثيراً.

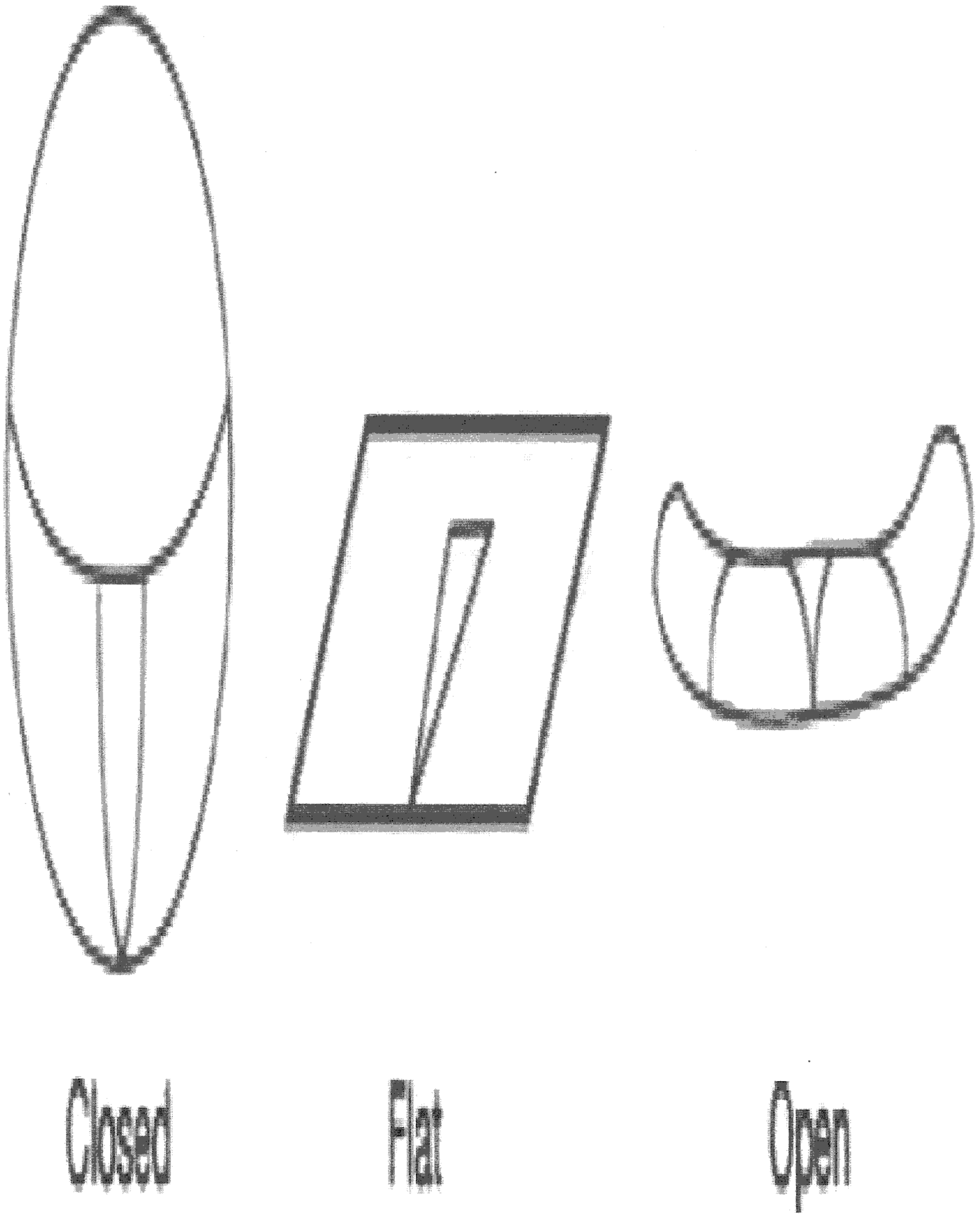
على أي حال، أعاد بوميرانغ صورة لجزء صغير من السماء الميكروية تعرض البقع الساخنة والباردة في نمط الإشعاع القادم من سطح التشتت الأخير. ونعرض في الأسفل صورة واحدة للمنطقة التي رصدتها تجربة بوميرانغ (البقع الحارة والبقع الباردة ظُلِّلت غامقة وفاتحة على التوالي) وهي مُركّبة على الصورة الأصلية للتجربة:

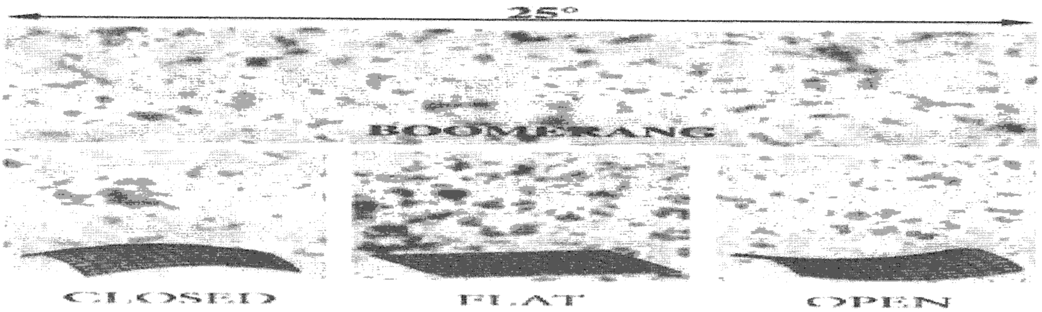


تخدم هذه الصورة غرضين على ما أعلم، الأول، يعرض المقياس الفيزيائي الفعلي للبقع الساخنة والباردة كما رآها بوميرانغ في السماء، مع الصور الأمامية للمقارنة. ولكنه يوضح أيضاً جانباً هاماً آخر مما يمكن فقط أن يسمى قصر نظرنا الكوني. فعندما ننظر في يوم مشمس، نرى السماء الزرقاء، كما هو مبين في الصورة السابقة للمنطاد. ولكن هذا لأننا قد تطورنا لرؤية الضوء المرئي. وقد فعلنا هذا _بلا شك_ لأن الضوء من سطح قمم شمسنا في المنطقة المرئية، وأيضاً لأن العديد من الأطوال الموجية الأخرى من الضوء تُمتص في غلافنا الجوي، حتى أنها لا يمكن أن تصل إلى سطح الأرض. على أية حال، لو أننا تطورنا لرؤية الإشعاع الميكروني، كانت ستأخذنا صورة السماء التي سنراها ليلاً أو نهاراً _طالما أننا لا ننظر مباشرةً إلى الشمس_ بشكل مباشر إلى سطح التشتت الأخير، بعيداً إلى أكثر من ١٣ مليار سنة ضوئية. هذه هي الصورة العائدة عن طريق كاشف بوميرانغ.

كانت الرحلة الأولى لبوميرانغ _التي أنتجت هذه الصور_ محظوظة جداً. مع أن قارة القطب الجنوبي ذات بيئة عدائية لا يمكن التنبؤ بها. وفي رحلة لاحقة، في عام ٢٠٠٣، فقدت التجربة بأكملها تقريباً بسبب عطل في المنطاد تبعته عاصفة. وقد أنقذ الموقف قرار في الدقيقة الأخيرة بترك البالون قبل أن ينفجر إلى بعض الأماكن التي يتعذر الوصول إليها، وقامت بعثة البحث بتعيين مكان الحمولة على سهل القطب الجنوبي واستعادت المَركب المضغوط المحتوي على البيانات العلمية. وقبل تفسير صورة بوميرانغ، أريد أن أؤكد مرة أخرى أن الحجم الفيزيائي الفعلي للبقع الحارة والباردة المسجلة على صورة بوميرانغ ثابت بالفيزياء البسيطة المرتبطة بسطح التشتت الأخير، في حين أن الاحجام المقاسة للبقع الحارة والباردة في الصورة مستمدة من هندسة الكون. قد يساعد التشبيه ثنائي الأبعاد على زيادة تفسير النتيجة: في بعدين، تشبه الهندسة المغلقة سطح الكرة، في حين أن الهندسة المفتوحة تشبح سطح السرج. فإذا رسمنا مثلثاً على هذه الأسطح، فإننا نلاحظ التأثير الذي وصفته، حيث تتلاقى الخطوط المستقيمة على الكرة، وتتباعد على السرج، وبطبيعة الحال، تبقى مستقيمة على سطح مسطح:

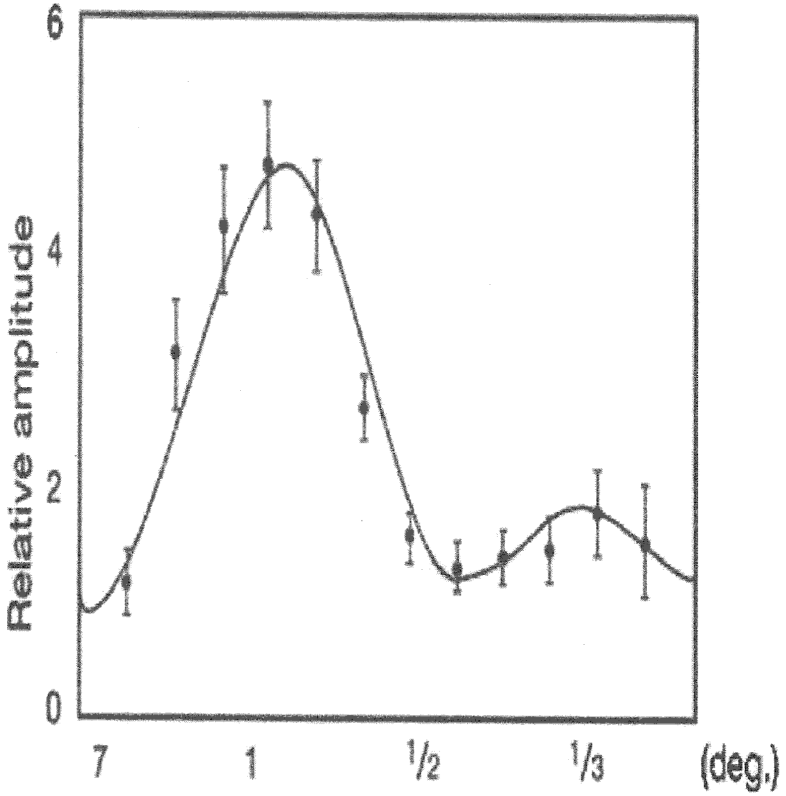
إذن فسؤال المليون دولار الآن هو، كم هو حجم البقع الحارة والبقع الباردة في صورة بوميرانغ؟ للإجابة عن ذلك، أعد فريق بوميرانغ عدة صور محاكاة على جهاز الكمبيوتر للبقع الحارة والباردة كما هو الحال في الأكوان المغلقة والمسطحة والمفتوحة، وقارن هذا مع صورة (بألوان أخرى مستعارة) السماء الميكروية الفعلية.



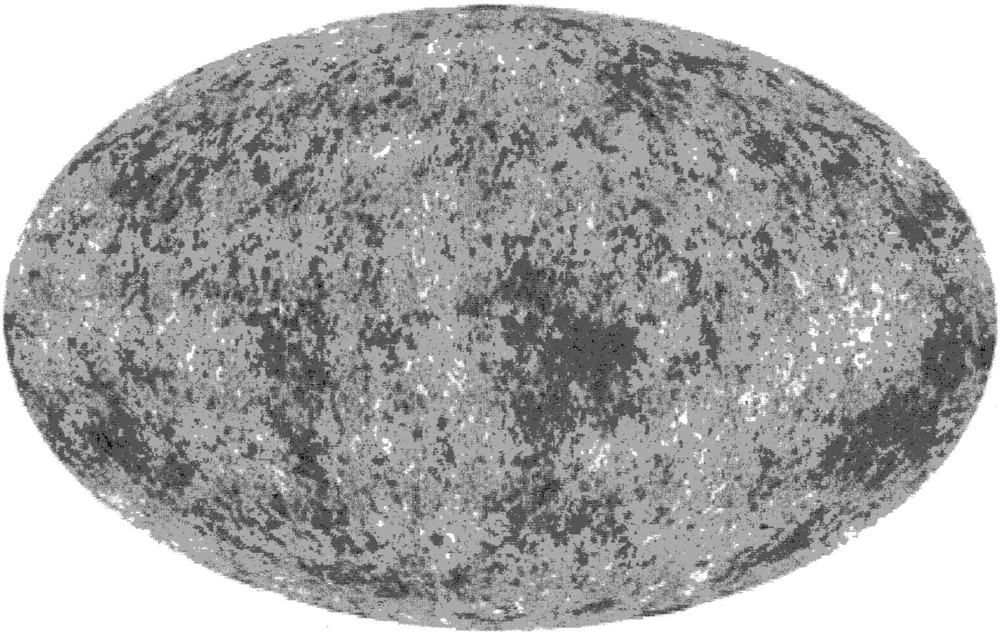


إذا تفحّصت الصورة على اليسار في الأسفل _من محاكاة كون مغلق_ سترى أن متوسط البقع أكبر من الكون الفعلي. على اليمين، متوسط حجم البقع أصغر. ولكن صورة الوسط _التي تقابل محاكاة كون مسطح_ صحيحة تماماً. يبدو أن الكون الجميل رياضياً الذي أمِله النظريون قد برهنته هذه الملاحظة، على الرغم من أنه يبدو أنه يتعارض بشدة مع التقديرات التي تمت من خلال وزن عناقيد المجرات.

في الواقع، فإن الاتفاق بين التنبؤات لكون مسطح والصورة التي حصل عليها بوميرانغ هو محرج تقريباً. فبعد فحص البقع والبحث عن الأكبر التي كان لديها الوقت لتنهار نحو الداخل في الزمن الذي يعكسه سطح التشتت الأخير، أنتج فريق بوميرانغ الرسم البياني التالي:
البيانات هي النقاط. والخط الجامد يعطي التنبؤ لكون مسطح مع أكبر نتوء يحدث بالقرب من 1 درجة!



ومنذ أن نشرت تجربة بوميرانغ نتائجها، أطلقت وكالة ناسا مسباراً أكثر حساسية ليسبر إشعاع الخلفية المايكروي، مسبار ويلكنسون لاختلاف الموجات الميكروية (WMAP). سمي تيمّناً بالفيزيائي الراحل ديفيد ويلكنسون، الذي كان واحداً من فيزيائيي جامعة برينستون الأصليين الذين كان ينبغي أن يكتشف إشعاع الخلفية المايكروي الكوني (CMBR) لولا أن سبقه علماء معامل بيل، وقد أطلق مسبار WMAP في حزيران ٢٠٠١. وقد أرسل إلى مسافة مليون ميل من الأرض، على الجانب البعيد للأرض من الشمس حيث يمكن رؤية السماء الميكروية دون تلوث أشعة الشمس. على مدى سبع سنوات قام بتصوير السماء الميكروية بأكملها (ليس فقط جزء من السماء كما فعل بوميرانغ، الذي كان عليه التعامل مع وجود الأرض تحته) مع دقة لا مثيل لها.



هنا السماء بأكملها معروضة على مسطح، تماماً كما يمكن عرض سطح الكرة الأرضية على خريطة مسطحة. إن مسطح مجرتنا يقع على خط الاستواء، و٩٠ درجة فوق مسطح مجرتنا يكون القطب الشمالي على هذه الخريطة، و٩٠ درجة تحت مسطح مجرتنا يكون القطب الجنوبي. غير أن صورة المجرة قد أُزيلت من الخريطة لكي تعكس فقط الإشعاع القادم من سطح التشتت الأخير.

مع هذا النوع من البيانات الرائعة يمكن إجراء تقدير أكثر دقة لهندسة الكون. تماثل خريطة WMAP الخريطة التي عرضتها بوميرانغ باختلاف دقيق يصل إلى ١٪ أننا نعيش في كون مسطح! كانت توقعات النظريين صحيحة. ولكن مرة أخرى، لا يمكننا تجاهل التعارض الواضح بين هذه النتيجة والنتيجة التي شرحناها في الفصل السابق. وزن الكون عن طريق قياس كتلة المجرات والعناقيد يعطي معامل قيمته أصغر بثلاث مرات من الكمية المطلوبةِ لتُنتج كوناً مسطحاً.

وفي حين كان النظريون يربتون على ظهور بعضهم للتخمين بأن الكون مسطح. تقريباً لم يكن أحد على استعداد للمفاجئة التي كانت في جعبة الطبيعة لحل التقديرات المتعارضة لهندسة الكون القادمة من قياس كتلة مقابل قياس الانحناء مباشرة. فالطاقة المفقودة اللازمة لإنتاج الكون المسطح اتضح أنها مختبئة تحت أنوفنا تماماً، حرفياً.

الكثير من الضجيج حول لا شيء

خطوة إلى الأمام، خطوتين إلى الخلف، هذا ما يبدو في بحثنا ومنحه وجهاً دقيقاً. على الرغم من أن الملاحظات قد حددت أخيراً ونهائياً انحناء كوننا _والتأكد من صحة الشكوك النظرية التي بقيت طويلاً_ فجأة، وعلى الرغم من أنه كان معروفاً أن في الكون عشرة أضعاف المادة الموجودة كما تمثلها البروتونات والنيوترونات، وحتى الكمية الهائلة للمادة المُعتمة التي تشكل ٣٠٪ مما كان مطلوباً لإنتاج كون مسطح، لم تكن كافية لتفسير كل هذه الطاقة في الكون. إن القياس المباشر لهندسة الكون وما تبع ذلك من اكتشاف بأن الكون مسطح بالفعل يعني أن ٧٠٪ من طاقة الكون لا تزال مفقودة، ليست في المجرات ولا حتى حول المجرات أو حتى في عناقيد المجرات!

لنعد إلى عام ١٩١٧، نذكر أن أينشتاين قد طور النسبية العامة، وفرحه باكتشاف إمكانيته في تفسير الحركة البدارية لحضيض عطارد، حتى لو كان عليه مواجهة حقيقة أن نظريته لا يمكن أن تفسر كوناً استاتيكياً كالذي كان يعتقد أننا نعيش فيه.

لو كان لديه قدر أكبر من الشجاعة في قناعاته، كان قد توقع أن الكون لا يمكن أن يكون ثابتاً، لكنه لم يفعل ذلك. وبدلاً من ذلك، أدرك أنه يمكن أن يحدث تغييراً طفيفاً في نظريته، وهو ما كان متسقاً تماماً مع الحجج الرياضية التي أدت به إلى تطوير النسبية العامة في المقام الأول، والتي تبدو وكأنها قد تسمح بكون استاتيكي.

وفي حين أن التفاصيل معقدة، فإن البنية العامة لمعادلات أينشتاين في النسبية العامة مباشرة نسبياً. فالجانب الأيسر من المعادلات يصف انحناء الكون، ومعه، قوة قوى الجاذبية التي تعمل على المادة والإشعاع. وتحدد هذه بالمقدار على الجانب الأيمن من المعادلة، مما يعكس الكثافة الكلية لجميع أنواع الطاقة والمواد داخل الكون.

أدرك أينشتاين أن إضافة ثابت إضافي صغير إلى الجانب الأيسر من المعادلة سيمثل قوة زائدة صغيرة منفّرة ثابتة في جميع أنحاء الفضاء بالإضافة إلى قوة الجاذبية المعيارية بين الأجسام البعيدة التي تقل بازدياد المسافة بينها. لو كانت صغيرة بما فيه الكفاية، قد تكون هذه القوة

غير قابلة للكشف على المقاييس البشرية أو حتى على مقاييس نظامنا الشمسي، حيث قانون نيوتن للجاذبية يبقي بشكل جميل. لكنه علل ذلك، لأنه كان ثابتاً عبر كل الفضاء، فيمكنه أن يتراكم على مقياس مجرتنا ويكون كبيراً بما فيه الكفاية لمقاومة القوى الجاذبة بين الأجسام البعيدة جداً. وبالتالي فقد اعتبر أن هذا يمكن أن يؤدي إلى كون ثابت على أكبر المقاييس.

ودعا أينشتاين هذا الثابت الإضافي باسم (الثابت الكوني cosmclogical constant). وعندما أدرك أينشتاين أن الكون يتوسع فعلاً، فقد استغنى عن هذا الثابت ويقال إنه دعا قرار إضافته بأكبر خطأ له.

ولكن التخلص منه ليس بهذه السهولة. فذلك يشبه محاولة إرجاع معجون الأسنان إلى الأنبوبة. وذلك لأن لدينا الآن صورة مختلفة تماماً عن الثابت الكوني اليوم، حتى لو لم يُضف أينشتاين هذا الثابت، شخص آخر كان ليضيفه خلال تلكم السنوات.

إن نقل ثابت أينشتاين من الجانب الأيسر من معادلاته إلى الجانب الأيمن هو خطوة صغيرة لعالم الرياضيات ولكنها قفزة عملاقة لعالم الفيزياء. فبمجرد أن يصبح الثابت على الجانب الأيمن، حيث توجد كل الحدود التي تسهم في طاقة الكون، فإنه يمثل شيئاً مختلفاً من المنظور الفيزيائي، وهو مساهمة جديدة في الطاقة الكلية. ولكن بأي نوع من الأشياء يمكن أن يساهم هذا الثابت؟

الجواب هو، لا شيء.

واللا شيء في هذه الحالة هو الذي نسميه الفضاء الفارغ. ويعني أنه إذا أخذنا مساحة من الفضاء وتخلصنا من كل شيء في داخلها، الغبار، الغاز، الناس، وحتى الإشعاع المار منها، حرفياً كل شيء داخل هذه المنطقة، إذا كان لهذا الفضاء الفارغ وزن، عندها سيتوافق مع وجود حد كوني كالذي وضعه أينشتاين.

هذا يجعل ثابت آينشتاين الكوني أكثر جنوناً! سيخبرك أي طالب في الصف الرابع عن كمية الطاقة في اللا شيء، حتى لو كانوا لا يعرفون ما هي الطاقة. وستكون الإجابة: لا شيء.

للأسف، فإن معظم طلاب الصف الرابع لم يأخذوا ميكانيكا الكم، كما أنهم لم يدرسوا النسبية. فعندما يمزج أحدهم نتائج النسبية الخاصة لآينشتاين في الكون الكمي، تصبح المساحة الفارغة أكثر غرابة مما كانت عليه. ومن الغريب حقيقةً أن الفيزيائيين الذين اكتشفوا وحللوا هذا السلوك الجديد كان من الصعب عليهم أن يصدقوا وجوده بالفعل في العالم الحقيقي.

أول شخص نجح في دمج النسبية في ميكانيكا الكم كان الفيزيائي النظري البريطاني العبقري بول ديراك، الذي لعب دوراً رائداً في تطوير ميكانيكا الكم كنظرية.

عالم الكم الذي قدمه أولاً بور Bohr، وحسّنها رياضياً شرودنجر وهايزنبرج، يتحدى كل المفاهيم المنطقية المبنية على خبرتنا مع الأشياء على المقياس البشري. اقترح بور أولاً أن الإلكترونات في

الـذرات تـدور حـول نـواة مركزيـة، كـما تفعـل الكواكـب حـول الشـمس، ولكـن تبـين أن القواعـد الملحوظـة للطيـف الـذري (تـرددات الضـوء المنبعـث مـن العنـاصر المختلفـة) لا يمكـن فهمهـا إلا إذا كانـت الإلكترونـات تقتـصر عـلى مـدارات ثابتـة في مجموعـة ثابتـة مـن (المسـتويات الكميـة) ولا يمكـن أن تـدور بحريـة حلزونيـاً نحـو النـواة. يمكـن أن تتحـرك بـين المسـتويات عـن طريـق امتصـاص أو بعـث تـرددات منفصلـة أو كـمات مـن الضـوء الكـمات التـي اقترحهـا أولاً ماكـس بلانـك في عـام ١٩٠٥ كوسـيلة لفهـم أشـكال الإشـعاع المنبعثـة مـن الأجسـام السـاخنة.

غـير أن (قواعـد التكميـم quantization rules) التـي وضعهـا بـور كانـت مخصصـة. في عشرينـات القـرن العشريـن، أثبـت شرودنجـر وهايزنـبرغ بشـكل مسـتقل عـن بعضهـما أنـه مـن الممكـن اسـتخلاص هـذه القواعـد مـن المبـادئ الأولى إذا أطاعـت الإلكترونـات قوانـين الحركـة المختلفـة عـن تلـك التـي تطبـق عـلى الأجسـام المرئيـة بالعـين المجـردة مثـل كـرة البيسـبول. ويمكـن أن تتـصرف الإلكترونـات مثـل الموجـات وكذلـك مثـل الجزيئـات، فتبـدو منتـشرةً في الفضـاء (مـن هنـا أتى شرودنجـر بالدالـة الموجيـة للإلكترونـات)، وأظهـرت نتائـج قياسـات خصائـص الإلكترونـات بالمحصّلـة فقـط تحديـدات ترجيحيـة، مـع عـدم القـدرة عـلى قيـاس مجموعـات مختلفـة مـن الخصائـص المختلفـة تمامـاً في نفـس الوقـت (مـن هنـا أتى هايزنـبرغ بمبـدأ عـدم اليقـين).

في عـام ١٩٢٩، وصفـت معادلـة شرودنجـر بشـكل جميـل ودقيـق سـلوك الإلكترونـات المتحركـة بسرعـات أقـل بكثـير مـن الضـوء. ووجـد ديـراك أنـه إذا عـدّل معادلـة شرودنجـر في معادلـة أكـثر تعقيـداً باسـتخدام أجسـام تسـمى مصفوفـات _مـا يعنـي أن معادلتـه وصفـت حقـاً مجموعـة مـن أربـع معـادلات مختلفـة مقترنـة_ يمكنـه بشـكل متسـق توحيـد ميكانيـكا الكـم مـع النسـبية، وبالتـالي مـن حيـث المبـدأ وصـف سـلوك الأنظمـة التـي تتحـرك فيهـا الإلكترونـات بسرعـات أكـبر كثـيراً.

ولكـن كانـت هنـاك مشـكلة، فقـد كتـب ديـراك معادلـة تهـدف إلى وصـف سـلوك الإلكترونـات بتفاعلهـا مـع المجـالات الكهربائيـة والمغناطيسـية. لكـن تُبـين معادلتـه أيضـاً أنهـا تتطلـب وجـود جسـيمات جديـدة مثـل الإلكترونـات تمامـاً ولكـن بشـحنة كهربيـة معاكسـة.

في ذلك الوقت، كان هناك جسيم واحد فقط في الطبيعة معروف ذو شحنة تعاكس التي في الإلكترون وهـو البروتـون. ولكـن البروتونات ليست على الإطلاق كالإلكترونات. فهـي مثلاً أثقل منها بـ ٢٠٠٠ مرة!

كان ديـراك محتـاراً. وفي حالـة مـن اليـأس اقـترح أن الجسـيمات الجديـدة هـي في الواقـع بروتونـات، ولكـن بطريقـة مـا عندمـا تتحرك عـبر الفضاء، فـإن تفاعـلات البروتونات سـتجعلها تتصرف كـما لو كانت أثقـل. ولم يسـتغرق الأمـر وقتـاً طويلاً للآخريـن _بما فيهم هايزنـبرغ_ لإظهار أن هذا الاقـتراح لا معنى له.

وجـاءت الطبيعـة بسرعـة للإنقـاذ. في غضـون عامـين اقـترح ديـراك معادلتـه، وبعـد عـام استسـلم وقَبِـل أنـه إن كان عملـه صحيحـاً، فـإن هنـاك جسـيم جديـد يجـب أن يكـون موجـوداً، وقـد اكتشـف

التجريبيون الذين يبحثون في الأشعة الكونية النازلة على الأرض أدلةً على وجود جسيمات جديدة مماثلة للإلكترونات ولكن مع شحنة كهربية معاكسة، وأطلق عليها اسم بوزيترونات positrons.

تم تبرير ديراك، لكنه أيضاً لاحظ عدم ثقته في نظريته الخاصة في البداية، فقال في وقت لاحق أن معادلته كانت أذكى مما كان عليه!

نسمي الآن البوزيترون الجسيم المضاد للإلكترون، لأنه تبين أن اكتشاف ديراك كان في كل شيء. فالفيزياء ذاتها التي تتطلب جسيماً مضاداً للإلكترون للوجود، تتطلب وجود جسيم واحد من هذا القبيل تقريباً لكل الجسيمات الأولية في الطبيعة. فمثلاً، للبروتونات بروتونات مضادة. حتى بعض الجسيمات المحايدة مثل النيوترونات لها جسيمات مضادة. وعند اجتماع الجسيمات والجسيمات المضادة تتحول إلى إشعاع نقي.

في حين أن كل هذا قد يبدو كأنه خيال علمي، فإننا نخلق جسيمات مضادة طوال الوقت في مسرعات الجسيمات الكبيرة في جميع أنحاء العالم. ولأن الجسيمات المضادة لها نفس خصائص الجسيمات، فإن العالم المصنوع من المادة المضادة سيتصرف بنفس الطريقة التي يتصرف بها عالم من المادة. إنها مجرد مصادفة في ظروفنا، ترجع باعتقادنا إلى عوامل أعمق سنصل لها لاحقاً، أننا نعيش في كون يتكون من المادة وليس المادة المضادة أو من كمية متساوية منهما.

وجود جسيمات مضادة يجعل العالم المرئي مكاناً أكثر إثارة للاهتمام، ولكن تبين أيضاً أنها تجعل الفضاء الفارغ أكثر تعقيداً بكثير.

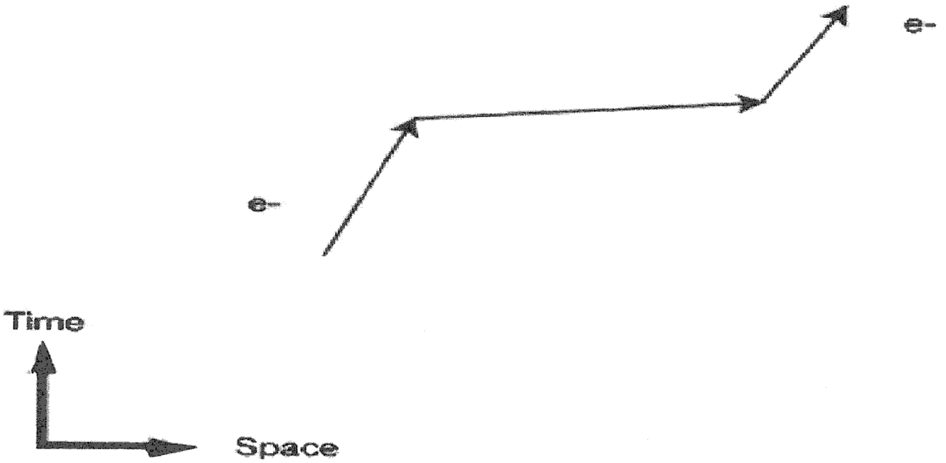
كان الفيزيائي ريتشارد فاينمان أول شخص يقدم فهماً بديهياً عن لماذا تتطلب النسبية وجود جسيمات مضادة، مما أدى أيضاً إلى عرض توضيحي أن الفضاء الفارغ ليس فارغاً تماماً.

أدرك فاينمان بأن النسبية تخبرنا بأن المراقبين المتحركين بسرعات مختلفة سينتجون قياسات مختلفة للكميات مثل المسافة والوقت. على سبيل المثال، سوف يبدو الوقت بطيئاً للأجسام المتحركة بسرعة كبيرة. إذا سارت هذه الأجسام بطريقة ما بسرعة أكبر من الضوء، فإنها ستبدو عائدةً في الزمن إلى الوراء، وهذا واحد من الأسباب لاعتبار سرعة الضوء أقصى سرعة كونية.

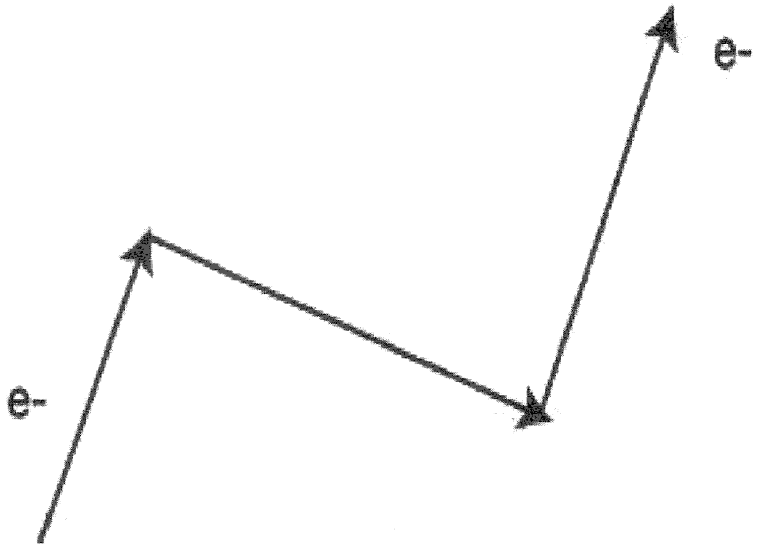
مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ مبدأ أساسي في ميكانيكا الكم، وهو ينص _كما ذكرنا سابقاً_ أنه من المستحيل أن نحدد قيماً دقيقة لكميتين معينتين _مثل الموقع والسرعة_ في نظام معين في نفس الوقت. وإذا قمت بقياس نظام معين لوقت محدود وثابت، لن تستطيع تحديد طاقته الكلية بدقة.

وهذا ما يتضمن أنه لفترات قصيرة جداً لدرجة لا نستطيع قياس سرعتها بدقة عالية، تسمح ميكانيكا الكم باحتمالية أن هذه الجسيمات كما لو أنها تتحرك أسرع من الضوء! ولكن، إذا كانت تتحرك أسرع من الضوء، يخبرنا أينشتاين أنها ستتصرف كما لو أنها تتحرك رجوعاً في الزمن!

كان فاينـمان شـجاعاً بما يكفـي ليأخـذ هـذه الاحتماليـة ويستكشـف ما تنطوي عليه. ورسـم الشـكل البيـاني التـالي لإلكـترون يتحـرك، مسرعـاً بشـكل دوري في منتصـف رحلتـه إلى سرعـة أسرع مـن الضـوء.



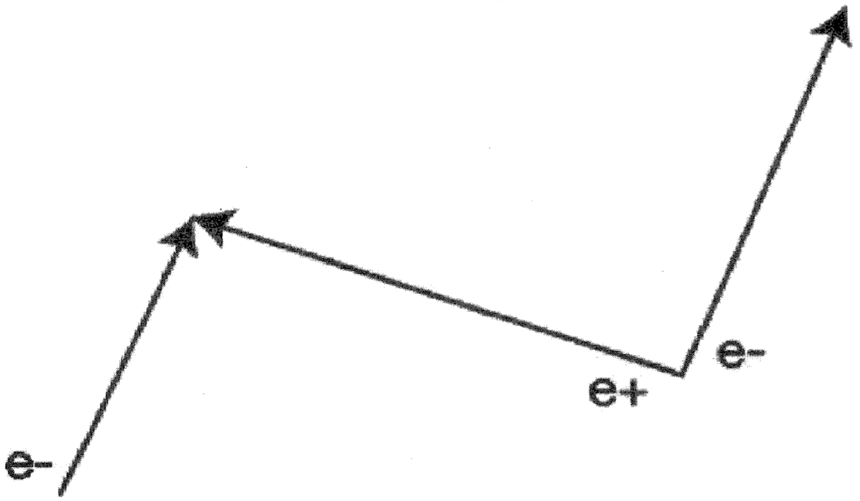
وأدرك أن النسـبية سـوف تخبرنـا أن مراقبـاً آخـر قـد يقيـس بـدلاً مـن ذلـك شـيئاً مـن شـأنه أن يظهـر عـلى النحـو المعـروض أدنـاه، مـع الإلكـترون المتحـرك إلى الأمـام في الزمـن، ثـم إلى الـوراء في الزمـن، ومـن ثـم إلى الأمـام مـرة أخـرى.



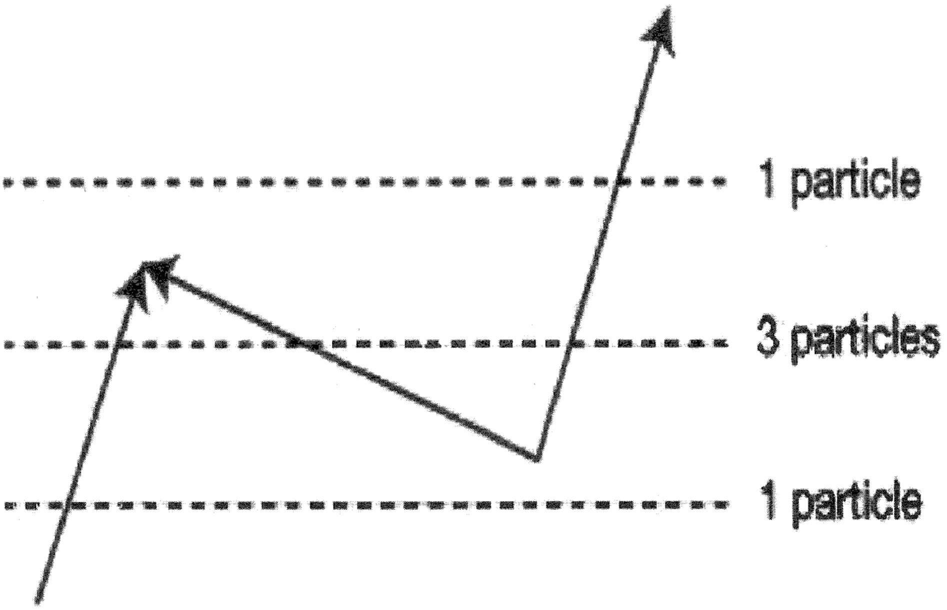
إن الشـحنة السـالبة المتحركـة رجوعـاً في الزمـن تعـادل رياضيـاً الشـحنة الموجبة المتحركـة إلى الأمام في الزمـن! وبالتـالي، فإن النسـبية تتطلب وجود جزيئات مشـحونة إيجابياً بنفس كتلـة وخصائص الإلكترون.

في هـذه الحالـة يمكـن أن يُعـاد تفسـير الرسـم الثـاني عـلى النحـو التـالي: إلكـترون واحـد يتحـرك إلى الأمـام، ثـم عنـد نقطـة أخـرى في الفضـاء ينشـأ زوج إلكترون-بوزيـترون مـن لا شيء، ثـم يلتقـي

البوزيـترون بالإلكـترون الأول ويفنــي الاثنــان. فيبقــى واحــد بإلكـترون واحـد يتحـرك إلى الأمـام.



إذا لم يزعجـك هـذا، فانظـر فيـما يـلي: لبعـض الوقـت، حتـى لـو كنـت تبـدأ مـع جسـيم واحـد، وتنتهـي مـع جسـيم واحـد، لفـترة قصـيرة هنـاك ثـلاث جسـيمات تتحـرك.



في الفـترة المختـصرة الوسـطى، عـلى الأقـل لفـترة وجيـزة، وُلـد شيء مـن لا شيء! يصـف فاينـمان بشـكل جميـل هـذه المفارقـة الظاهريـة في ورقـة علميـة لـه عـام ١٩٤٩ (نظريـة البوزيترونـات)، مـع تشـبيه سـارٍّ في زمـن الحـرب:

(كـما لـو أن مدفعيـاً يراقـب طريقـاً واحـداً مـن خـلال جهـاز تصويـب القنابـل الجـوي مـن طائـرة تحلـق عـلى ارتفـاع منخفـض، وفجـأة يـرى ثـلاث طـرق، وفقـط عندمـا يجتمـع اثنـان منهـما معـاً

ويختفيان ثانيةً يُدرك أنه ببساطة قد مرّ فوق تعرّج في طريق واحد).

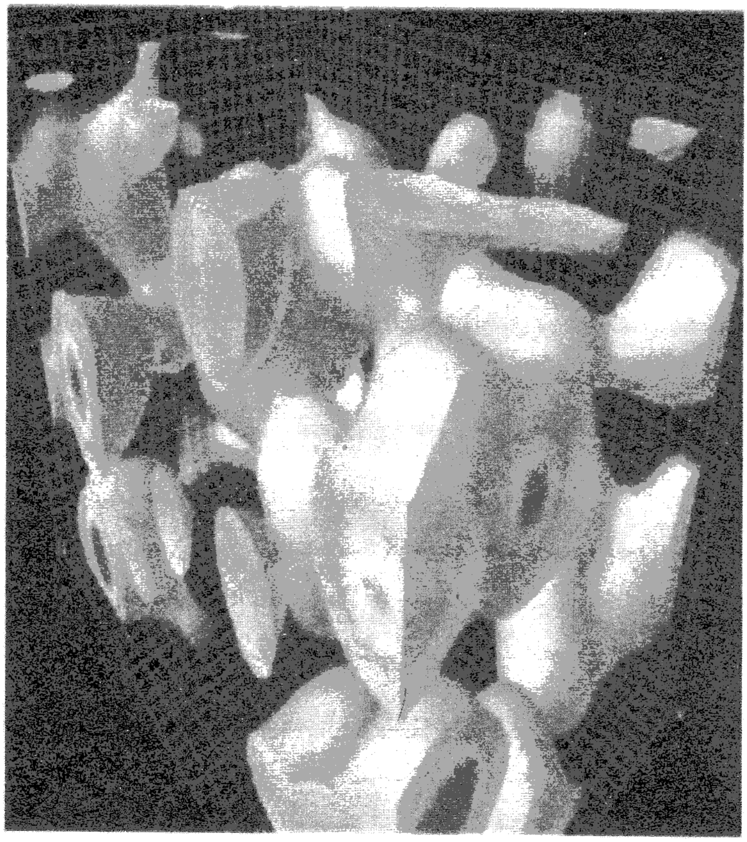
وطالما أن هذه الفترة الزمنية خلال هذا التعرج قصيرة جداً بحيث لا يمكننا قياس جميع الجسيمات مباشرةً، فإن ميكانيكا الكم والنسبية تتضمن أن هذا الوضع الغريب ليس مسموحاً به فحسب، بل هو مطلوب أيضاً. وتسمى الجسيمات التي تظهر وتختفي في مقاييس زمنية قصيرة جداً ليتم قياسها بالجسيمات الافتراضية virtual particles.

إن ابتكار مجموعة جديدة من الجسيمات لا يمكن قياسها في فضاء فارغ، تبدو مثل اقتراح عدد كبير من الملائكة يجلسون على رأس دبوس، وكانت لتكون بنفس الأهمية لو لم يكن لهذه الجسيمات تأثيرات يمكن قياسها. على الرغم من أنها ليست واضحة بشكل مباشر، اتّضح أن تأثيراتها غير المباشرة تُنتج معظم خصائص الكون الذي نَخبره اليوم. وليس هذا فقط، بل ويمكن حساب تأثيرات هذه الجسيمات على نحو أدق من أي حساب آخر في العلم.

في حين أن الدقة المذهلة المتاحة في الفيزياء الذرية من الصعب مضاهاتها، فإن هذه الجسيمات الافتراضية تلعب دوراً رئيساً قد يكون أكثر أهمية للقضية المركزية لهذا الكتاب. حيث اتضح أنها مسؤولة عن معظم الكتلة الخاصة بك، وتلك التي في كل شيء مرئي في الكون.

واحد من النجاحات الكبيرة في سبعينيات القرن الماضي هو فهمنا الأساسي للمادة الذي جاء مع اكتشاف نظرية تصف بدقة التفاعلات بين الكواركات _وهي الجسيمات التي تشكل البروتونات والنيوترونات_ التي تكوّن المواد التي تشكّلك وتشكّل كل شيء تراه. إن الرياضيات المرتبطة بهذه النظرية معقدة، واستغرق الأمر عدة عقود قبل أن تُطوَّر التقنيات التي يمكن التعامل معها، وخاصة في النظام حيث يصبح التفاعل القوي بين الكواركات قابلاً للتقدير. وقد أُطلق جهد هائل، بما في ذلك بناء بعض أجهزة الكمبيوتر المعالجة الموازية الأكثر تعقيداً، التي تستخدم في نفس الوقت عشرات الآلاف من المعالجات الفردية، من أجل محاولة حساب الخصائص الأساسية للبروتونات والنيوترونات، الجسيمات التي نقيسها بالفعل.

بعد كل هذا العمل، لدينا الآن صورة جيدة لما يبدو عليه داخل البروتون. قد يكون هناك ثلاث كواركات داخله، ولكن هناك أيضاً الكثير من الأشياء الأخرى. على وجه الخصوص، الجسيمات الافتراضية التي تعكس الجسيمات والمجالات التي تنقل القوة القوية بين الكواركات تظهر وتختفي طوال الوقت. وفيما يلي لقطة تُظهر كيف تبدو الأمور. وهي ليست صورة فوتوغرافية بالطبع، لكنها بالأحرى أداء فني للرياضيات التي تحكم حركة الكواركات والمجالات التي تربطهم. تعكس الأشكال الغريبة والظلال المختلفة قوة المجالات المتفاعلة مع بعضها ومع الكواركات داخل البروتون بينما تظهر الجسيمات الافتراضية وتختفي بشكل تلقائي.



يمتلئ البروتون بهذه الجسيمات الافتراضية بشكل متقطع، في الواقع، عندما نحاول تقدير كمية إسهامها في كتلة البروتون، نجد أن الكواركات نفسها توفر القليل جداً من الكتلة الإجمالية، وتساهم الحقول التي تنشئها هذه الجسيمات بأغلب الطاقة الذاهبة إلى الطاقة الساكنة للبروتون. وبالتالي إلى كتلته الساكنة. وينطبق الشيء ذاته على النيوترون، وبما أننا مصنوعون من البروتونات والنيوترونات، فذات الشيء ينطبق علينا!

الآن، إن استطعنا حساب تأثيرات الجسيمات الافتراضية على الفضاء الفارغ في الذرات وحولها، وأن نحسب تأثيرات الجسيمات الافتراضية على الفضاء الفارغ داخل البروتونات، ألن نكون عندها قادرين على حساب تأثيرات الجسيمات الافتراضية على الفضاء الفارغ الحقيقي؟

حسناً، في الواقع هذا الحساب أصعب، لأننا عندما نحسب تأثير الجسيمات الافتراضية على الذرات أو على كتلة البروتون، فإننا نحسب في الواقع الطاقة الكلية للذرة أو البروتون بما في ذلك الجسيمات الافتراضية، ثم نحسب الطاقة الكلية التي يمكن أن تسهم بها الجسيمات الافتراضية دون الذرة أو البروتون (أي في الفضاء الفارغ). ثم نطرح العددين من أجل العثور على التأثير الصافي على الذرة أو البروتون. ونحن نقوم بذلك لأنه اتضح أن كلاً من هاتين الطاقتين هو

لانهائي إجرائياً عندما نحاول حل المعادلات المناسبة. ولكن عندما نطرح الكميتين، ونخلص إلى فرق نهائي، وعلاوةً على ذلك فإنه فرق يتوافق بدقة مع القيمة المُقاسة!

على كل حال، إذا أردنا حساب تأثير الجسيمات الافتراضية على الفضاء الفارغ فقط، فليس لدينا شيء لنقوم بطرحه، وبالتالي فالجواب الذي نحصل عليه هو لا نهائي.

اللانهائية ليست كمية سارّة _ على حد علم الفيزيائيين إلى الآن على الأقل_ ونحاول تجنب ذلك قدر الإمكان. ومن الواضح أن طاقة الفضاء الفارغ (أو أي شيء آخر بهذه المسألة) لا يمكن أن تكون لانهائية فيزيائياً، لذلك علينا أن نجد طريقة للحساب والحصول على إجابة محدودة.

من السهل وصف مصدر اللانهائية. عندما نأخذ في عين الاعتبار جميع الجسيمات الافتراضية التي يمكن أن تظهر، فإن مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ (عدم اليقين في الطاقة المقاسة للنظام يتناسب عكسياً مع طول الزمن الذي ترصده فيه) يتضمن أن الجسيمات ذات الطاقة الأعلى يمكن أن تظهر تلقائياً من لا شيء طالما أنها تختفي في أوقات أقصر. من حيث المبدأ، يمكن للجسيمات أن تحمل طاقة لانهائية تقريباً طالما أنها تختفي في أوقات قصيرة لامتناهية القصر تقريباً.

مع ذلك، فإن قوانين الفيزياء كما نفهمها تنطبق فقط على مسافات وأزمنة أكبر من قيمة معينة، تنطبق مع المقياس حيث تؤخذ تأثيرات ميكانيكا الكم بعين الاعتبار عند محاولة فهم الجاذبية (وتأثيراتها المرتبطة بالزمكان). إلى حين أن يكون لدينا نظرية (الجاذبية الكمية) _كما يُطلق عليها_ لا يمكننا أن نثق بالاستقراءات التي تتجاوز هذه الحدود.

لذلك، فإننا نأمل أن تصل الفيزياء الجديدة المرتبطة بالجاذبية الكمية إلى قطع (cutoff) _بطريقة ما_ تأثيرات الجسيمات الافتراضية التي تبقى لزمن أقل من زمن بلانك. إذا افترضنا أن التأثيرات التراكمية للجسيمات الافتراضية للطاقة فقط مساوية أو أقل من التي يسمح بها القطع المؤقت، فسوف نصل إلى تقدير محدود للطاقة التي تساهم بها الجسيمات الافتراضية في اللا شيء.

لكن هناك مشكلة. تبين أن هذا التقدير تقريباً 10^{120} مرة أكبر من الطاقة المرتبطة بكل المادة المعروفة في الكون، بما في ذلك المادة المعتمة!

إذا كان حساب مسافات مستوى الطاقة الذرية بما في ذلك الجسيمات الافتراضية هو أفضل حساب في كل الفيزياء، فهذا التقدير لطاقة الفضاء الفارغ هو الأسوأ بلا شك! إذا كانت طاقة الفضاء الفارغ في أي مكان قريبة من هذا الحجم الكبير، فإن القوة المنفرة المُنتجَة (تذكر أن طاقة الفضاء الفارغ تطابق الثابت الكوني) ستكون كبيرة بما يكفي لتفجير الأرض اليوم، ولكن الأهم من ذلك، أنها ستكون كبيرةً جداً في أوقات مبكرة بحيث تدفع كل ما نراه اليوم في الكون بعيداً عن بعضه بسرعة كبيرة في أول جزء من الثانية من الانفجار الكبير، فما كانت لتتشكل

البنى ولا النجوم ولا الكواكب، ولا البشر.

هذه المشكلة _التي تسمى مشكلة الثابت الكوني_ كانت موجودة منذ فترة طويلة، وأول من صرّح بها عالم الكون الروسي ياكوف زيلدوفيتش عام١٩٦٧. لا تزال المشكلة بلا حل وربما تكون المشكلة الأساسية الأكثر عمقاً غير المحلولة في الفيزياء اليوم.

على الرغم من حقيقة أننا لم يكن لدينا أي فكرة عن كيفية حل المشكلة لأكثر من أربعين عاماً، فعلماء الفلك يعرفون ما يجب أن يكون الجواب. مثل طالب الصف الرابع الذي افترضت أن إجابته ستكون أن طاقة الفضاء الفارغ يجب أن تكون صفراً، شعرنا أيضاً بهذا عندما استُخلصت نظرية نهائية تفسر كيف يمكن إلغاء تأثيرات الجسيمات الافتراضية، تاركةً الفضاء الفارغ بطاقة صفر بالضبط. أو بالأحرى لا شيء.

كان برهاننا أفضل من طالب الصف الرابع، أو هكذا اعتقدنا. احتجنا إلى تقليص مقدار طاقة الفضاء الفارغ من القيمة العملاقة بحق التي اقترحها التقدير الساذج إلى قيمة تتفق مع الحدود العليا التي تسمح بها الملاحظة. وهذا يتطلب طريقةً ما لطرح عدد إيجابي كبير جداً من عدد إيجابي كبير جداً حتى يلغي الاثنين بعضهما إلى ١٢٠ منزلة عشرية، ليتركا شيئاً غير صفري في المكان العشري ١٢١. ولكن ليس هناك سابقة في العلم لإلغاء عددين كبيرين بهذه الدقة مع ترك شيء صغير للغاية.

إن الصفر هو رقم سهل أن يُنتَج. وغالباً ما يسمح لنا التناظر في الطبيعة بتحديد مساهمات متساوية ومعاكسة آتية من أجزاء مختلفة من الحساب، تُلغى تماماً، ولا تترك أي شيء على وجه التحديد. أو ـ مرة أخرى ـ لا شيء.

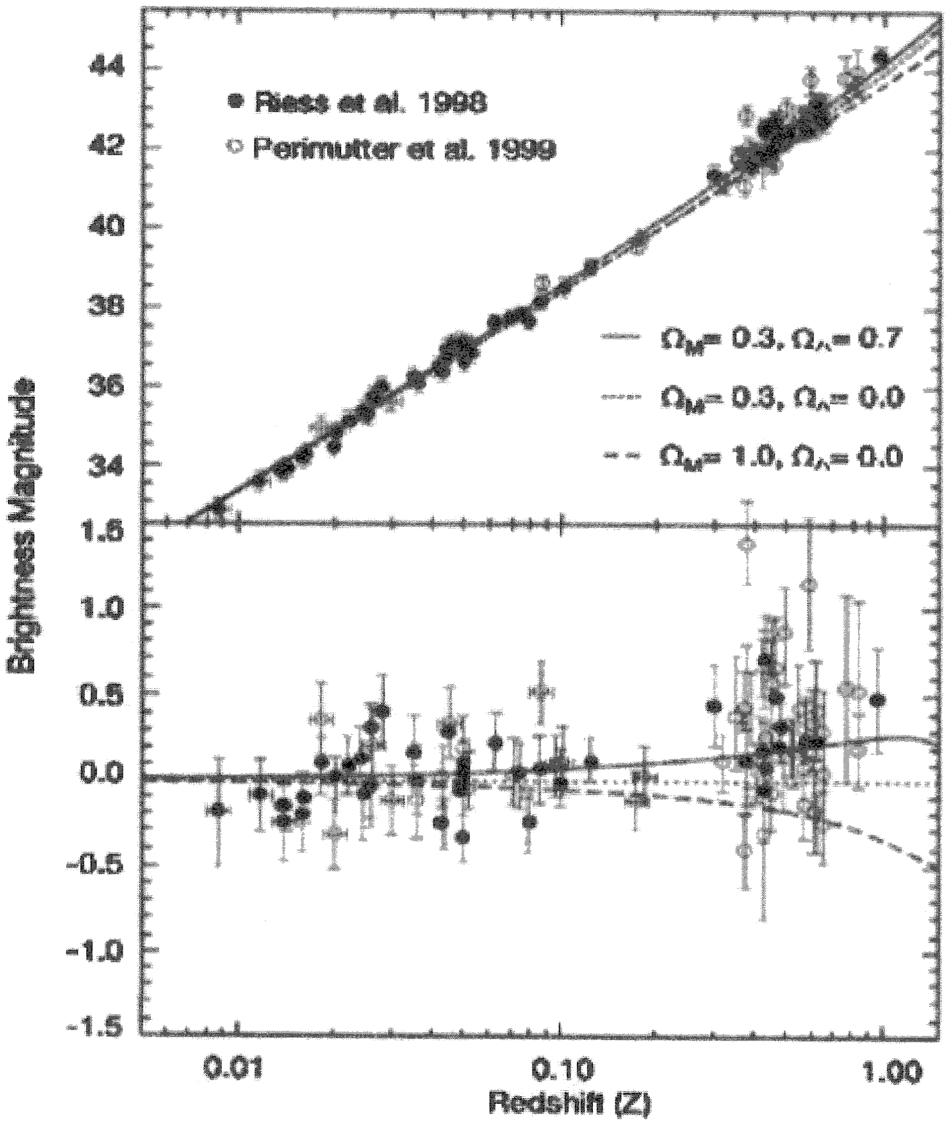
وهكذا، استطاع النظريون أن يرتاحواويناموا ليلاً. لم يكونوا يعرفون كيف يصلون إلى هناك، لكن كانوا على يقين مما يجب أن تكون عليه الإجابة النهائية.

مع ذلك، كان للطبيعة رأي مختلف.

الكون الهارب

جادل ل.كروس ومايكل تيرنر عام ١٩٩٥ بالاستناد إلى أكثر من تحيز نظري أن الكون مسطح، ثم استُنتج أن جميع البيانات الكونية المتاحة في ذلك الوقت كانت متسقة مع كون مسطح، فقط إذا كان حوالي ٣٠٪ من إجمالي الطاقة يسكن في شكل ما من (المادة المظلمة)، وكما يبدو أن الملاحظات تشير إلى وجودها حول المجرات والعناقيد المجرية، ولكن ما هو أكثر غرابة من هذا هو أن ٧٠٪ المتبقية من الطاقة الكلية في الكون ليست في أي شكل من أشكال المادة، ولكن بالأحرى في الفضاء الفارغ ذاته.

في العقد المنصرم، اتضح أن الأدلة على تسارع التوسع أصبحت ساحقة، ولا يمكن التغلب عليها تقريباً. أولاً، تم قياس عدد أكبر من المستعرات العظمى عند انزياح أحمر عالي. ومنها، تم عمل تحليلات مشتركة للمستعرات العظمى من المجموعتين في غضون سنة من المنشور الأصلي أسفرت عن الرسم البياني التالي:



كمرشد للعين، ولمساعدتك على رؤية ما إذا كان منحنى المسافة مقابل الانزياح الأحمر ينحني صعوداً أو هبوطاً، رسم الراصدون خطاً مستقيماً منقطاً في النصف الأعلى من الرسم البياني من أسفل اليسار إلى الزاوية اليمنى العليا يمر عبر البيانات الممثلة للمستعرات العظمى القريبة. فيخبرنا منحدر هذ الخط عن معدل التوسع اليوم. بعدها، في النصف السفلي من الصورة صنعوا نفس الخط المستقيم أفقياً، لإرشاد العين. إذا كان الكون آخذاً بالتباطؤ _كما كان متوقعاً في عام ١٩٩٨_، فإن

المستعرات العظمى البعيدة عند الانزياح الأحمر (z) القريبة من ١ ستنزل تحت الخط المستقيم. ولكن كما ترون، فإن معظمهم يقع فوق الخط المستقيم. ويرجع ذلك إلى أحد السببين التاليين:

١ـ البيانات خاطئة.

٢ـ توسع الكون يتسارع.

إذا أخذنا البديل الثاني وسألنا: كم من الطاقة يجب أن نضع في الفضاء الفارغ لإنتاج التسارع الملحوظ؟ وخرجنا بجواب رائع. المنحنى الثابت، الأكثر مناسبةً للبيانات، يتناسب مع كون مسطح، مع ٣٠٪ من الطاقة في المادة و٧٠٪ في الفضاء الفارغ. وهذا على وجه التحديد ما هو مطلوب لتكوين كون مسطح، يتفق مع حقيقة أن ٣٠٪ فقط من الكتلة المطلوبة موجود في المجرات والعناقيد المجرية وحولها. تم تحقيق انسجام واضح.

ومع ذلك، لأن الادعاء بأن ٩٩٪ من الكون غير مرئي يناسب فئة الادعاءات غير العادية، يجب أن ننظر بجدية في الاحتمال الأول، وهو أن البيانات خاطئة. واصلت بقية البيانات من علم الكونيات ترسيخ صورة التوافق العام للكون المسطح الذي تسكن فيه الطاقة المهيمنة في الفضاء الفارغ والذي كل ما نستطيع رؤيته فيه أقل من ١٪ من الطاقة الإجمالية، مع المادة التي لا نراها المكوَّنة غالباً من نوع جديد غير معروف من الجسيمات الأولية.

في الاكتشاف العلمي التالي، تمكّن المراقبون من القياس الدقيق لكيف تعنْقدت المادة معاً في شكل مجرات على مدى الزمن الكوني. تعتمد النتيجة على معدل توسع الكون، حيث تنافس قوة الجذب التي تبقي المجرات معاً التمدد الكوني الذي يقود المادة بعيداً عن بعضها. وكلما زادت قيمة الطاقة في الفراغ، سرعان ما ستهيمن على طاقة الكون، وسرعان ما سيوقف معدل التوسع المتزايد انهيار المادة بسبب الجاذبية على مقاييس أكبر.

من خلال قياس تعنقدات الجاذبية، استطاع المراقبون التأكيد مرة أخرى على أن الكون المسطح الوحيد الذي يتسق مع الهيكل الكبير الملاحَظ في الكون هو كون ذو طاقة معتمة تقارب الـ ٧٠٪، وأن الطاقة المعتمة ـمرةً أخرىـ تتصرّف أكثر أو أقل مثل الطاقة التي يمثلها الثابت الكوني.

في وقت سابق من تاريخ الكون، عندما كانت منطقتنا المرئية الحالية أصغر بكثير في الحجم، وكانت كثافة المادة أكبر بكثير. مع ذلك، فإن كثافة طاقة الفراغ الفارغ تبقى كما هي على مر الزمن في حال كانت تعكس ثابتاً كونياً أو شيئاً مشابهاً. لذلك، عندما كان الكون أقل من حوالي نصف حجمه الحالي، فإن كثافة طاقة المادة تجاوزت كثافة طاقة الفضاء الفارغ. في كل الأوقات قبل هذا الوقت، كانت المادة ـوليس الفضاء الفارغـ ما يُنتج قوة الجاذبية المهيمنة التي تعمل على التوسع. ونتيجة ذلك، تباطأ الكون.

في الميكانيكا الكلاسيكية هناك اسم للنقطة التي يغير فيها النظام تسارعه _وخصوصاً_ عندما يذهب من التباطؤ إلى التسارع. يُسمّى (معدل تغير التسارع بالنسبة للزمن jerk). في عام ٢٠٠٣، نظّم ل.كراوس مؤتمراً في جامعته لدراسة مستقبل علم الكونيات، ودعا أحد أعضاء دراسة المستعر الأعظم High-Z، آدم ريس، الذي قال أنه سيكون لديه شيء مثير ليبلّغه في الاجتماع. وقد فعل. في اليوم التالي، وضعت صحيفة نيويورك تايمز _التي كانت ترفع تقريراً عن الاجتماع_ صورة آدم يرافقها عنوان «اكتشاف معدل تغير التسارع الكوني Cosmic Jerk Discovered».

إن رسم الخرائط المفصلة لتاريخ التوسع الكوني _الذي يوضح التحول من فترة التباطؤ إلى التسارع_ أضاف وزناً جوهرياً إلى الادعاء بأن الملاحظات الأصلية _التي تنطوي على وجود طاقة معتمة_ كانت صحيحةً في الواقع. مع كل الأدلة الأخرى المتاحة الآن _أعجبنا ذلك أو لم يعجبنا_ يبدو أن الطاقة المعتمة باقية، أو على الأقل باقية حتى تتغير بطريقة ما.

الغداء المجاني في نهاية الكون

زاد حجم الكون بمعامل يقرب من تريليون منذ كان عمره ثانية واحدة. إذا _في تلك اللحظة المبكرة_ كانت كثافة الكون ليست كما هو متوقع في كون مسطح، لتغيرت اليوم كثافة الكون عما تكون في كون مسطح بمعامل تريليون على الأقل. وهذا أكبر بكثير من المعامل ١٠٠ الذي كان معروفاً لفصل كثافة المادة المرئية في الكون عن الكثافة التي تنتج كوناً مسطحاً اليوم.

كانت هذه المشكلة معروفة جيداً، حتى في سبعينيات القرن الماضي باسم مشكلة التسطح. النظر في هندسة الكون هو مثل تخيل قلم رصاص متوازن عمودياً على رأسه فوق طاولة. أقل خلل في التوازن بطريقة أو بأخرى سيسقطه بسرعة. كذلك هو حال الكون المسطح. أقل انحراف عن التسطح سينمو سريعاً. إذن، كيف يمكن أن يكون الكون قريباً جداً من أن يكون مسطحاً اليوم إذا لم يكن مسطحاً تماماً؟ الجواب بسيط: يجب أن يكون أساساً مسطحاً اليوم!

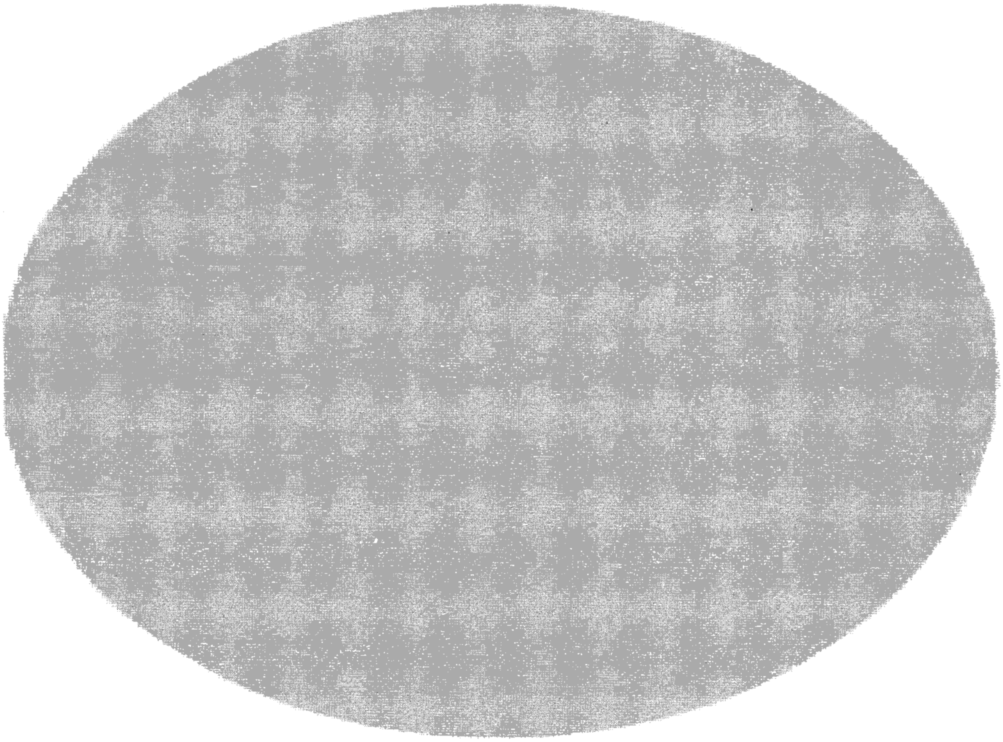
في الواقع إن الإجابة ليست بهذه البساطة، لأنها تثير السؤال: كيف تعاونت الشروط الأولية لإنتاج كون مسطح؟

هناك إجابتان على هذا السؤال الثاني الأكثر صعوبة. الأول يعود إلى عام ١٩٨١، حين فكّر الفيزيائي النظري آلان جوث في مشكلة التسطح واثنين من المشاكل الأخرى ذات الصلة مع صورة الانفجار الكبير القياسية للكون: ما يسمى مشكلة الأفق ومشكلة القطب الواحد. وهنا تهمنا فقط المشكلة الأولى، لأن مشكلة القطب الواحد فقط تفاقم مشكلة التسطح والأفق.

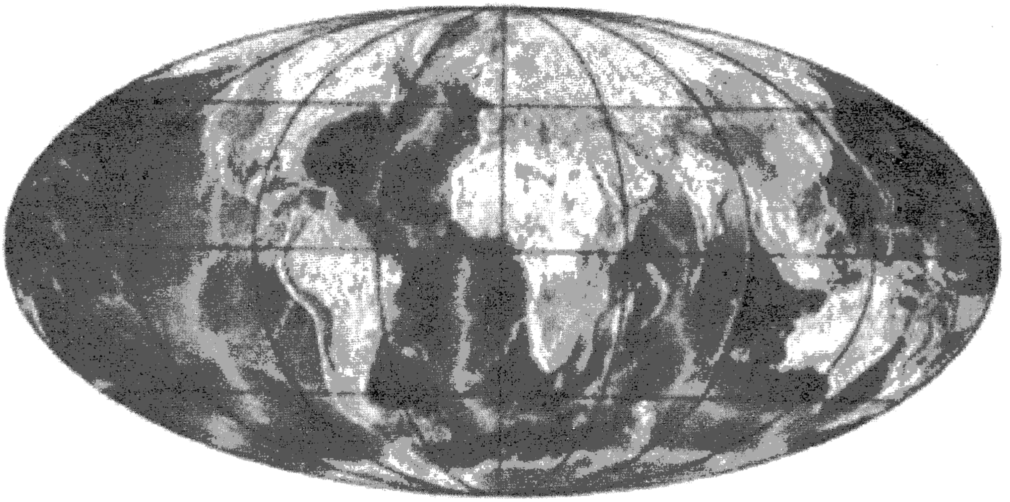
تتعلق مشكلة الأفق بحقيقة أن إشعاع الخلفية الكونية الميكروي متجانس إلى أبعد الحدود.

إن انحرافات درجات الحرارة الصغيرة ـالتي وصفناها سابقاًـ تمثل اختلافات الكثافة في المادة والإشعاع، عندما كان عمر الكون بضعة مئات الآلاف من السنين، بأقل من جزء في الـ ١٠ آلاف بالمقارنة مع كثافة وحرارة الخلفية المتجانسة. وفي حين نركز على الانحرافات الصغيرة، كان هناك سؤال أعمق وأكثر إلحاحاً، كيف كان للكون أن يكون متجانساً جداً في المقام الأول؟

إذا بدلنا الصورة السابقة من CMBR (حيث تنعكس انحرافات درجات الحرارة التي هي بضعة أجزاء في الـ ١٠٠ بألوان مختلفة)، بصورة خريطة حرارية للسماء الميكروية على مقياس خطي (مع اختلافات في الظلال تمثل الاختلافات في درجات الحرارة، على سبيل المثال ±٠,٠٣ درجة كلفن هي في متوسط حرارة الخلفية حوالي ٢,٧٢ درجة فوق الصفر المطلق، أو اختلاف جزء واحد في ١٠٠ في المتوسط)، فستبدو الخريطة كما يلي:



قارن هذه الصورة التي لا تحتوي على شيء ملحوظ في البنية، بإسقاط مماثل من سطح الأرض، مع حساسية أكبر قليلاً فقط، وتغيرات الألوان الممثلة للاختلافات حول متوسط الإشعاع بحوالي درجة واحدة في ٥٠٠ أو نحو ذلك:



لذلك، فإن الكون _على مقاييس كبيرة_ متجانس بشكل لا يصدق!

كيف يمكن هذا؟ حسناً، يمكن للمرء أن يفترض ببساطة أنه في وقت مبكر، كان الكون المبكر حاراً وكثيفاً وفي حالة توازن حراري. هذا يعني أن أي بقع ساخنة قد تبرد، والبقع الباردة قد تسخن حتى وصل الحساء البدائي إلى نفس درجة الحرارة في كل أنحائه.

وكما أشرنا سابقاً، عندما كان عمر الكون بضع مئات الآلاف من السنين، كان للضوء أن يسافر بضع مئات الآلاف من السنين الضوئية، وهو ما يمثل نسبة مئوية صغيرة مما هو الآن الكون المرئي الكلي (هذه المسافة تمثل فقط زاوية بقياس درجة واحدة على كامل خريطة سطح التشتت الأخير الخلفي الميكروي الكوني كما هو ملاحظ اليوم). وبما أن أينشتاين يخبرنا بأنه لا يمكن أن تنتشر المعلومات بأسرع من سرعة الضوء، في صورة الانفجار الكبير القياسية، فليس هناك طريقة لأي جزء مما هو الآن الكون المرئي في ذلك الوقت أن يكون قد تأثر بوجود أو حرارة الأجزاء الأخرى على مقياس زاوي أكبر من درجة واحدة. وبالتالي، ليس هناك طريقة ليتوازن الغاز حرارياً على هذه المقاييس في الوقت المناسب لينتج تجانساً حرارياً في جميع الأنحاء!

كان جوث _وهو فيزيائي جسيمات_ يفكر في العمليات التي كان يمكن أن تحدث في الكون المبكر وقد تكون ذات صلة لفهم هذه المشكلة عندما وصل إلى إدراك عبقري تماماً. لو أن الكون _وهو يتبرد_ خضع لتحول مرحليّ (كتجمد المياه أو تمغنط قطعة الحديد عند انخفاض حرارتها) فلن يمكن حل مشكلة الأفق فحسب، بل أيضاً مشكلة التسطح (وبالتالي مشكلة القطب الواحد).

إذا كنت تحب شرب البيرة الباردة، قد تكون خبرت هذه التجربة: تأخذ زجاجة البيرة الباردة من الثلاجة، وعند فتحها يتحرر الضغط من العلبة، وتتجمد البيرة تماماً، وقد يتصدع جزء من الزجاجة خلال ذلك. يحدث ذلك لأنه في حالة الضغط العالي، تكون حالة الطاقة الأدنى المفضلة

على شكل سائل. في حين أنه بمجرد تحرير الضغط. تكون حالة الطاقة المنخفضة المفضلة للبيرة هي الحالة الصلبة. خلال المرحلة الانتقالية، يمكن إطلاق طاقة لأن حالة الطاقة الأدنى في مرحلة معينة قد تملك طاقةً أقل من حالة الطاقة الأدنى في مرحلة أخرى. عندما تحرر مثل هذه الطاقة، يشار إليها باسم (الحرارة الكامنة).

أدرك جوث أنه بينما يبرد الكون مع توسع الانفجار الكبير، فربما علق تكوين المادة والإشعاع في الكون المتوسع في حالة شبه استقرار لفترة من الزمن حتى في النهاية _بينما يتبرد الكون أكثر_ خضع هذا التكوين لتغير مرحليّ إلى الحالة القاعية للطاقة المفضلة للطاقة والإشعاع. يمكن للطاقة المختزنة في الفراغ الزائف المُهيّأة للكون قبل اكتمال التحول المرحليّ أن تؤثر بشكل كبير على توسع الكون خلال الفترة السابقة على التحول.

قد تتصرف طاقة الفراغ المزيف تماماً مثل الذي يمثله ثابت كوني لأنها ستتصرف كأنها طاقة تتخلل فضاءً فارغاً. وهذا قد يؤدي إلى توسع الكون في ذلك الوقت بسرعة أكبر وأكبر. وفي نهاية المطاف، ما سيصبح كوننا المرئي سوف يبدأ بالنمو أسرع من سرعة الضوء. وهذا مسموح في النسبية العامة، على الرغم من أنه يبدو أنه ينتهك النسبية الخاصة، التي تقول بأن لا شيء يمكن أن يسافر أسرع من سرعة الضوء. ولكن يجب أن نحلل هذا بعناية أكبر. النسبية الخاصة تقول إن لا شيء يمكن أن يسافر عبر الفضاء أسرع من سرعة الضوء. ولكن الفضاء نفسه يمكنه أن يفعل ما يريد، على الأقل في النسبية العامة. وأثناء توسع الفضاء، يمكنه أن يحمل أجساماً بعيدةً، هي ثابتة في الفضاء، بعيداً عن بعضها البعض بسرعات أكبر من سرعة الضوء.

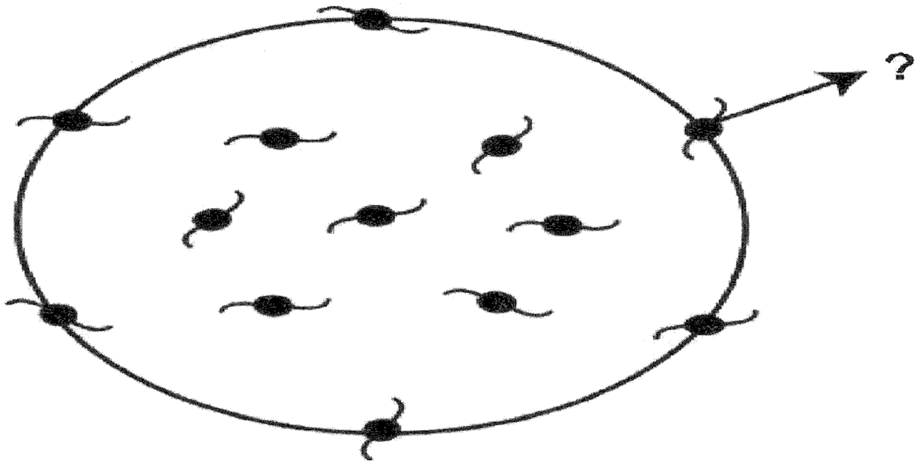
اتضح أن الكون قد يكون توسع خلال هذه الفترة التضخمية بمعامل أكبر من $١٠^{٢٨}$. في حين أن هذه كمية ضخمة جداً، فقد حدثت في جزء من الثانية في الكون المبكر جداً. في هذه الحالة، كان كل شيء في كوننا المرئي _قبل حدوث التضخم_ في منطقة أصغر بكثير من أن نتعقّبها رجوعاً لو لم يحدث التضخم، والأهم من ذلك، أنها صغيرة جداً لدرجة أنه كان سيكون هناك الوقت الكافي للمنطقة بأكملها لتتوازن حرارياً وتصل تماماً إلى نفس درجة الحرارة.

ينتج التضخم احتمالية توقع نوعيّ نسبي آخر. عندما ينتفخ البالون أكثر وأكثر، يصبح الانحناء على سطحه أصغر وأصغر. يحدث شيء مماثل للكون الذي يتسع حجمه أُسّياً، كما يمكن أن يحدث خلال التضخم، مدفوعاً بثابت وقوة فراغ زائف كبيرة. بالفعل، بحلول الوقت الذي ينتهي فيه التضخم (يحل مشكلة الأفق)، فإن انحناء الكون (إذا كان غير صفري في البداية) يحرك إلى قيمة صغيرة جداً بحيث _حتى اليوم_ يبدو الكون مسطحاً بشكل أساسي عند قياسه بدقة.

التضخم هو التفسير الوحيد القابل للتطبيق حالياً لكل من التجانس والتسطح في الكون، استناداً إلى النظريات الأساسيات الميكروسكوبية القابلة للحساب للجسيمات وتفاعلاتها. ولكن أكثر من هذا، ينتج التضخم توقعاً آخر، ربما أكثر إثارة. كما وصفنا سابقاً، فإن قوانين ميكانيكا الكم تتضمن على مقاييس صغيرة جداً لأوقات قصيرة جداً إمكانية ظهور الفضاء الفارغ كأنه شراب يغلي ويفور بالجسيمات الافتراضية والمجالات المتذبذبة بأحجام كبيرة جداً. وقد تكون هذه التذبذبات الكمية مهمة لتحديد خصائص البروتونات والذرات، لكنها بشكل عام غير مرئية على المقاييس الأكبر، وهذا أحد الأسباب الذي يجعلها تبدو غير طبيعية بالنسبة لنا.

يمكن لهذه التذبذبات الكمية _خلال التضخم_ تحديد متى تنتهي فترة التوسع الأُسّيّ لما سيصبح مناطق صغيرة مختلفة من الفضاء. وبينما يتوقف توسع مناطق مختلفة في أوقات مختلفة (مايكروسكوبياً)، فإن كثافة المادة والإشعاع الناتج عن تحرير طاقة الفراغ الزائف كطاقة حرارية في هذه المناطق المختلفة تختلف اختلافاً طفيفاً في كل منطقة.

إن نمط تذبذبات الكثافة الناتجة بعد التضخم _يجب أن أشدّد_ من التذبذبات الكمية في الفضاء الفارغ، تبين أنها تتفق تماماً مع الأنماط المرئية للبقع الحارة والبقع الباردة على المقاييس الكبيرة في إشعاع الخلفية الكونية الميكروي. في حين أن الاتساق ليس دليلاً بالطبع، فإن هناك رأياً متزايداً بين علماء الكون أنه _مرة أخرى_ إذا كان يمشي كبطة ويبدو كبطة ويصدر صوتاً كبطة، فإنه غالباً بطة. فإذا كان التضخم مسؤولاً عن جميع التذبذبات الصغيرة في كثافة المادة والإشعاع التي ستؤدي لاحقاً في انهيار تسببه الجاذبية للمادة إلى مجرات ونجوم وكواكب وناس، فعندها يمكن القول حقاً أننا جميعاً هنا اليوم بسبب التذبذبات الكمية فيما هو أساساً لا شيء.



هذا رائع جداً وأريد أن أؤكد عليه ثانيةً. تجمدت التذبذبات الكمية بسبب التضخم وينشأ بعد ذلك تذبذبات الكثافة التي تنتج كل شيء يمكننا رؤيته! إذا كنا جميعاً من غبار النجوم، فإنه صحيح أيضاً _إذا حدث التضخم_ أننا جميعاً نشأنا حرفياً من الفراغ الكمي.

ولكـن، مـن أيـن تـأتي كل الطاقة في المقـام الأول؟ كيف يمكن لمنطقـة صغيرة مايكروسـكوبية أن تنتهي بمنطقـة بحجـم الكـون اليـوم مع ما يكفي مـن المادة والإشـعاع داخله لتفسـير كل شيء نسـتطيع رؤيته؟

وبشـكل أعـمّ، قـد نطـرح السـؤال: كيـف يمكـن أن تظـل كثافـة الطاقـة ثابتـة في الكـون المتوسـع مـع ثابـت كـوني، أو طاقـة فـراغ زائـف؟ بعـد كل ذلـك _في مثـل هـذا الكـون_ يتوسـع الفضـاء أضعافاً مضاعفـة، حتـى إذا مـا ظلـت كثافـة الطاقـة ذاتهـا، فـإن الطاقـة الإجماليـة داخـل أي منطقـة سـتنمو بقـدر مـا سـتنمو المنطقـة. فـماذا حـدث لمبـدأ حفـظ الطاقـة؟

إن هـذا مثـال عـلى مـا سـماه جـوث الغـداء المجـاني الأقصى the ultimate "free lunch". إن تأثـير الجاذبيـة يسـمح للأجسـام أن يكـون لهـا طاقـة (سـالبة) وكذلـك (موجبـة). يسـمح هـذا الجانـب مـن الجاذبيـة بإمكانيـة إكـمال مكونـات الطاقـة الموجبـة _كالمـادة والإشـعاع_ بتكوينـات طاقـة سـالبة تـوازن التـي في مكونـات الطاقـة الموجبـة المتكونـة.

وبهذا، فيمكن للجاذبية أن تبدأ بكون فارغ، وتنتهي بآخر بواحد ممتلئ.

قـد يبـدو هـذا الأمـر مريبـاً، ولكـن في الواقـع هـو جـزء مركـزي مـن الافتتـان الحقيقـي الـذي لـدى الكثـير منـا مـع الكـون المسـطح. وهـو أيضـاً شيء قـد يكـون مألوفـاً لـك مـن فيزيـاء المدرسـة الثانويـة.

فكـر في رمـي كـرة في الهـواء. عمومـاً، سـوف تعـود للأسـفل. الآن ارميهـا بشـكل أقـوى (عـلى افـتراض أنـك لسـت في الداخـل). ستسـافر الكـرة أعـلى وتبقـى عاليـاً مـدة أطـول قبـل العـودة. أخـيراً، إذا رميتهـا بقـوة كافيـة، فإنهـا لـن تنزل على الإطلاق. بل سـتهرب من مجال جاذبية الأرض وتبقـى متجهةً خارجاً في الكون.

متـى سـنعرف متـى سـتهرب الكـرة؟ نسـتخدم مسـألة بسـيطة مـن حسـاب الطاقـة. للجسـم المتحـرك في مجـال الجاذبيـة الأرضيـة لـه نوعـان مـن الطاقـة. أولاً، طاقـة الحركـة وتسـمى الطاقـة الحركيـة kinetic energy. تعتمـد هـذه الطاقـة عـلى سرعـة الجسـم، وهـي موجبـة دائمـاً. أمـا النـوع الثـاني مـن الطاقـة، تسـمى طاقـة الوضـع (تتعلـق بإمكانيـة القيـام بعمـل)، وهـي سـالبة بوجـه عـام.

هـذا هـو الحـال لأننـا نحـدد طاقـة الجاذبيـة الكليـة للجسـم في موقـع سـاكن بعيـد بشـكل لانهـائي عـن أي جسـم آخـر بأنهـا صفـر، الـذي يبـدو معقـولاً. الطاقـة الحركيـة هـي صفـر بوضـوح، ونحـدد طاقـة الوضـع صفـراً في هـذه النقطـة، وبالتـالي فـإن طاقـة الجاذبيـة الكليـة هـي صفـر.

الآن، إذا لم يكـن الجسـم بعيـداً بشـكل لانهـائي عـن جميـع الأجسـام الأخـرى بـل كان قريبـاً مـن جسـم مـا _كالأرض مثـلاً_ فسـيبدأ بالسـقوط نحـو ذلـك الجسـم بسـبب جاذبيتـه. وتـزداد سرعتـه أثنـاء سـقوطه، وكلـما كان أقـرب إلى سـطح الأرض عنـد انطلاقـه، كلـما قلّـت إمكانيـة الفعـل الـذي يمكنـه القيـام بـه عنـد اصطدامـه بـالأرض. وبالتـالي، فـإن طاقـة الوضـع تنخفـض كلـما اقـترب مـن الأرض. لكـن إذا كانـت طاقـة الوضـع صفـراً عندمـا يكـون الجسـم بعيـداً بشـكل لانهـائي عـن الأرض، فيجـب

أن يحصل على المزيد والمزيد من الطاقة السالبة كلما اقترب من الأرض لأن قدرته على القيام بفعل ما تقل كلما اقترب أكثر.

في الميكانيكا الكلاسيكية _كما عرّفناها هنا_ تعريف طاقة الوضع اعتباطي. كان بإمكاننا أن نضع طاقة الوضع للجسم كصفر على سطح الأرض، وبعد ذلك سيكون رقماً أكبر عندما يكون الجسيم بعيداً بشكل لانهائي عنها. إن تحديد الطاقة الكلية بصفر في اللانهاية يعطي معنى فيزيائياً، ولكنه _على الأقل في هذه النقطة من نقاشنا_ مجرد اتفاق.

بغض النظر عن المكان الذي تُحدد فيه نقطة الصفر لطاقة الوضع، فإن الشيء الرائع حول الأشياء التي تخضع لقوة الجاذبية هو أن مجموع طاقتي الوضع والحركة يبقى ثابتاً. أثناء سقوط الأشياء، يتم تحويل طاقة الوضع إلى طاقة حركية، وبينما هي ترتد مبتعدةً عن الأرض، تعود وتتحول الطاقة الحركية إلى طاقة وضع، وهكذا.

يمنحنا هذا أداة تدوين رائعة لتحديد مدى السرعة التي يحتاجها المرء لرمي شيء ما إلى الأعلى بحيث يخرج من الأرض، حيث أنه إذا أصبح في النهاية بعيداً بُعداً لا نهائياً عن الأرض، فيجب أن تكون طاقته الإجمالية أكبر من أو تساوي الصفر.

بعد ذلك، يجب ببساطة ضمان أن طاقة جاذبيته الكلية في الوقت الذي يترك فيه يدي أكبر أو تساوي الصفر. وبما أنني أستطيع التحكم فقط في جانب واحد من طاقته الكلية _وهي السرعة التي يترك فيها يدي_ كل ما عليّ القيام به هو العثور على السرعة السحرية حيث تساوي الطاقة الحركية الموجبة للكرة طاقة الوضع السالبة لها بسبب جاذبية سطح الأرض. تعتمد كل من الطاقة الحركية وطاقة الوضع للكرة بنفس الطريقة بالضبط على كتلة الكرة، التي تُلغى عندما تتساوى هاتين الكميتين، ويجد المرء سرعة انفلات واحدة لجميع الأجسام من سطح الأرض، وهي حوالي ٧ أميال في الثانية، عندما تكون طاقة الجاذبية الإجمالية للجسم هي بالضبط صفر.

قد تسأل: وما علاقة كل هذا بالكون بشكل عام، والتضخم على وجه الخصوص؟ حسناً، نفس الحسابات بالضبط التي وصفتها للتو لكرة أرميها من يدي من على سطح الأرض تنطبق على كل جسم في كوننا المتوسع.

فكّر بمنطقة كروية من كوننا تتمركز على موقعنا (في مجرة درب التبانة) وكبيرة بما فيه الكفاية لتشمل الكثير من المجرات ولكن صغيرة بما يكفي لتكون داخل المسافات الأكبر التي يمكننا رصدها اليوم:

إذا كانت المنطقة كبيرة بما فيه الكفاية ولكن ليست كبيرة جداً، فإن المجرات على حافة المنطقة سوف تتراجع بسبب توسع هابل، ولكن سرعتها ستكون أقل بكثير من سرعة الضوء.

في هذه الحالة، تطبق قوانين نيوتن، ويمكننا تجاهل تأثيرات النسبية الخاصة والعامة. وبعبارة أخرى، فإن كل جسم تحكمه فيزياء متطابقة مع تلك التي تصف الكرات التي تخيلت للتو محاولة هروبه من الأرض.

فكّر في المجرة التي عُرضت سابقاً، تتحرك بعيداً عن مركز التوزيع كما هو مبين. الآن، تماماً كما هو الحال بالنسبة للكرة من الأرض، يمكننا أن نسأل ما إذا كانت المجرة سوف تكون قادرة على الهروب من سحب جاذبية جميع المجرات داخل المجال. والحساب الذي سنقوم به لتحديد الجواب هو بالضبط نفس الحساب الذي أجريناه للكرة. نحسب ببساطة طاقة الجاذبية الكلية للمجرة، استناداً إلى حركتها إلى الخارج (معطيةً لها طاقة إيجابية)، وسحب الجاذبية من جيرانها (توفر جزء الطاقة السالبة). إذا كان مجموع الطاقة أكبر من الصفر، فإنها ستهرب إلى ما لا نهاية، وإذا كانت أقل من الصفر، ستتوقف وتسقط إلى الداخل.

الآن _بشكل ملحوظ_ من الممكن أن نعرض أننا نستطيع إعادة كتابة معادلة نيوتن البسيطة لطاقة الجاذبية الكلية لهذه المجرة بطريقة تنتج بالضبط معادلة أينشتاين من النسبية العامة لكون متوسع. ويصبح الحد الذي يتوافق مع طاقة الجاذبية الكلية _في النسبية العامة_ هو الحد الذي يصف انحناء الكون.

فما الذي سنجده بعد ذلك؟ في الكون المسطح _وفقط في الكون المسطح_ فإن المتوسط الكلي لطاقة الجاذبية النيوتونية لكل جسم متحرك مع التوسع هو صفر!

هذا ما يجعل الكون المسطح خاصاً جداً. في مثل هذا الكون تُلغي الطاقة الموجبة للحركة الطاقة السالبة لقوة للجاذبية.

عندما نبدأ في تعقيد الأمور من خلال السماح للفضاء الفارغ بأن يكون له طاقة، فإن القياس النيوتوني البسيط للكرة التي يتم رميها في الهواء يصبح غير صحيح، ولكن الاستنتاج يبقى أساساً نفسه. في كون مسطح _حتى كون مع ثابت كوني صغير_ طالما أن المقياس صغير بما فيه الكفاية حيث السرعات هي أقل بكثير من سرعة الضوء، فإن طاقة الجاذبية النيوتونية المرتبطة بكل جسم في الكون هي صفر.

في الواقع، مع طاقة الفراغ، تصبح (وجبة الغداء المجانية) لجوث أكثر درامية، مع توسع كل منطقة من الكون إلى حجم أكبر، فإنها تصبح أقرب وأقرب لأن تكون مسطحة، بحيث أن طاقة الجاذبية النيوتونية الكلية لكل شيء نتج بعد طاقة الفراغ خلال التضخم وتحول إلى مادة وإشعاع، تصبح بالتحديد صفراً.

ولكن يبقى بإمكاننا أن نسأل: من أين تأتي كل الطاقة للحفاظ على كثافة الطاقة ثابتة خلال التضخم، عندما يتوسع الكون بشكل أُسّيّ؟ وهنا، جانب مهم آخر من النسبية العامة يقوم بالعمل. ليس فقط يمكن لجاذبية الأجسام أن تكون سالبة، ولكن ضغطها النسبي يمكن أن يكون سالباً.

إن تصور الضغط السالب أصعب من تصور الطاقة السالبة. فالغاز _لنقُل في بالون_ يمارس ضغطاً على جدران البالون. وفي فعله لذلك _إذا كان يوسع جدران البالون_ فإنه يقوم بعمل على البالون. والعمل الذي يقوم به الغاز يسبب له تبريداً وفقداناً للطاقة. واتضح أن طاقة الفضاء الفارغ هي جاذبية نافرة بالتحديد لأنها تسبب امتلاك الفضاء الفارغ لضغط سالب. وكنتيجة لهذا الضغط السالب، فالكون فعلاً يقوم بعمل على الفضاء الفارغ أثناء توسعه. يحفظ هذا العمل كثافة الطاقة ثابتة حتى أثناء توسع الكون.

هكذا، فإنه إذا انتهت الخصائص الكمية للمادة والإشعاع بمنح حتى منطقة متناهية الصغر من الفضاء الفارغ طاقةً في أوقات مبكرة جداً، يمكن لهذه المنطقة أن تنمو لتكون كبيرة ومسطحة اعتباطياً. عندما ينتهي التضخم، يمكن الانتهاء بكون مليء بالأشياء (مادة وإشعاع)، وإجمالي طاقة الجاذبية النيوتونية لتلك الأشياء ستكون أقرب إلى الصفر مما يمكن للمرء تصوره.

إذن حين هدأت الأمور واستقرت _وبعد قرن من المحاولة_ قمنا بقياس انحناء الكون ووجدنا أنه صفر. يمكنك أن تفهم لماذا وجد الكثير من النظريين هذا الأمر ليس بالمُرضي فحسب، بل أيضاً موحي للغاية.

كون من لا شيء.. فعلاً.

إن جوهر العلم المتشكك يجعله منافساً فقيراً لقلوب البشر وعقولهم، التي تنفر من جدله المستمر وتفضل الأمن فيما يبدو حقائق أبدية. فلو كان المنهج العلمي مجرد تأويل إضافي للكون، ما كان ليحقق الكثير؛ لكن نجاح العلم الكبير يستند على حقيقة أنه يعمل.

أصول

نِل ديجراس تايسون

دونالد جولدسميث

الفصل الثالث

أصول

في البدء

أحد السمات الرئيسة للفيزياء الكلاسيكية هو أن الأحداث والقوانين والتنبؤات معقولة عند التوقف والتفكر فيها. وقد تم اكتشافها واختبارها في مختبرات عادية في مباني عادية. ولا تزال قوانين الجاذبية والحركة، والكهرباء والمغناطيسية، وطبيعة وسلوك الطاقة الحرارية تدرس في فصول المدارس الثانوية. هذه الاكتشافات حول العالم الطبيعي قد غذّت الثورة الصناعية، ونفسها تحوّل الثقافة والمجتمع بطرق لم تتخيلها الأجيال السابقة، ولا تزال محور ما يحدث في عالم التجربة اليومية.

على النقيض من ذلك، لا شيء منطقي في الفيزياء المعاصرة لأن كل شيء يحدث في الأنظمة التي تتجاوز بكثير تلك التي تستجيب لها حواسنا البشرية. هذا أمر جيد، قد نلاحظ بسعادة أن حياتنا اليومية تبقى خالية تماماً من الفيزياء المتطرفة. في الصباح العادي، تنهض من السرير، تتجول في المنزل، تتناول شيئاً ما، ثم تخرج من الباب الأمامي. في نهاية اليوم يتوقع الناس أن تبقى كما أنت عندما خرجت، وأن تعود إلى المنزل قطعةً واحدة. ولكن تخيل نفسك تصل إلى المكتب، تدخل إلى قاعة المؤتمرات عالية الحرارة، وفجأةً تفقد كل إلكتروناتك أو أسوأ من ذلك، أن تطير كل ذرات جسمك بعيداً. افترض بدلاً من ذلك أنك جالس في مكتبك تحاول إنجاز بعض الأعمال على ضوء مصباحك ذو الـ ٧٥ واط، عندما يشغل شخص ما ضوءً ذو ٥٠٠ واط، مما يجعل جسمك يرتد بشكل عشوائي من جدار إلى آخر حتى تخرج من النافذة. أو ماذا لو ذهبت لمباراة في مصارعة السومو بعد العمل، فقط لترى المصارعين يصطدمان ويختفيان وبشكل تلقائي يصبحان شعاعي ضوء يخرجان من الغرفة في اتجاهات متعاكسة؟ أو افترض أنك في طريق عودتك إلى المنزل، وقمت بسلك طريق أقصر، فقام بناء مظلم بامتصاصك من القدمين أولاً، ممدّداً جسدك من رأسك إلى أخمص قدمك بينما يقوم باعتصارك وأنت تُقذف عبر فتحة، فلا تُرى أو يُسمع عنك مرةً أخرى.

لو كانت هذه المشاهد تحصل في حياتنا اليومية، كنا سنجد الفيزياء المعاصرة أقل غرابة

بكثير. فإن معرفتنا بأسس النسبية وميكانيكا الكم سوف تنبع بشكل طبيعي من تجارب حياتنا. ولكن بالعودة إلى الدقائق الأولى من عمر الكون فإن هذا النوع من الأشياء قد حدث في كل وقت. ولكي نتخيل المشهد ونفهمه ليس أمامنا خيار سوى إنشاء شكل جديد من الحس السليم، وتغيير الحدس حول كيفية سلوك المادة، وكيف تصف القوانين الفيزيائية سلوكها في أقصى درجات الحرارة والكثافة والضغط.

يجب أن ندخل عالم ط=ك×س٢ ($mc^2 = E$)

نشر ألبرت أينشتاين لأول مرة نسخة هذه المعادلة في عام ١٩٠٥، وهي السنة التي ظهرت فيها ورقة بحثه الأساسية بعنوان (في الديناميكا الكهربائية للأجسام المتحركة) في (حوليات الفيزياء)، المجلة الألمانية البارزة في الفيزياء. ولكن هذا العمل معروف بشكل أكبر باسم نظرية النسبية الخاصة لأينشتاين، التي قدمت مفاهيم غيرت للأبد نظرتنا للمكان والزمان. وفي عام ١٩٠٥ كان أينشتاين قد عرض المزيد من التفاصيل، بما في ذلك معادلته المعروفة في ورقة قصيرة جداً (صفحتان ونصف) نشرت في وقت لاحق من العام نفسه في نفس المجلة: (هل يعتمد القصور الذاتي للجسم على محتواه من الطاقة؟) والإجابة هي نعم. كما كتب أينشتاين: إذا أطلق الجسم الطاقة E في شكل شعاع، فستتناقص كتلته بمقدار E/c^2 ... كتلة الجسم هي مقياس لما يحتويه من الطاقة. فإذا تغيرت الطاقة بالقدر E تتغير الكتلة بنفس المعنى.

ها أنت تمتلكها: الوصفة الجبرية لجميع المناسبات التي تريد فيها تحويل المادة إلى طاقة، أو الطاقة إلى مادة. ط=ك×س٢ الطاقة تساوي الكتلة ضرب مربع سرعة الضوء تعطينا أداةً حاسوبيةً قويةً للغاية توسّع من قدرتنا على معرفة وفهم الكون بدءاً مما هو عليه الآن، على طول الطريق رجوعاً حتى جزء متناهي الصغر من الثانية بعد مولد الكون. مع هذه المعادلة، يمكنك معرفة مقدار الطاقة الإشعاعية التي يمكن أن ينتجها النجم، أو كم يمكنك أن تحصل عن طريق تحويل العملات في جيبك إلى شكل مفيد من الطاقة.

الشكل الأكثر ألفةً من الطاقة _مشرق في جميع الأنحاء، على الرغم من أن عيوننا لا تدركه_ هو الفوتون، عديم الكتلة، غير قابل للتقسيم من الضوء المرئي، أو أي شكل آخر من الإشعاع الكهرومغناطيسي. جميعنا يغتسل بشكل متواصل من الفوتونات: من الشمس والقمر والنجوم، من الموقد الخاص بك، الثريا، مصباحك الليلي، من مئات محطات الإذاعة والتلفزيون، ومن عدد لا يحصى من الهواتف المحمولة وإرسالات الرادار. لماذا إذن لا نرى فعلاً تحول الطاقة إلى مادة أو المادة إلى طاقة بشكل يومي؟ إن طاقة الفوتونات الشائعة هي أقل بكثير من كتلة أقل الجسيمات دون الذرية حجماً، عند تحويلها إلى طاقة بواسطة ط=ك×س٢. ولأن هذه الفوتونات تتمتع بقدر ضئيل جداً من الطاقة لتصبح شيئاً آخر، فإنها تقود حياةً بسيطة وخالية من الاحداث نسبياً.

هل تنتظر بعض العمل مع ط=ك×س٢؟ ابدأ بالتسكع مع فوتونات أشعة جاما التي تمتلك بعض الطاقة الحقيقية، على الأقل ٢٠٠ ألف مرة أكثر من الفوتونات المرئية. ستمرض سريعاً وتموت بالسرطان. ولكن قبل أن يحدث ذلك، سترى أزواجاً من الإلكترونات، واحد مصنوع من المادة، والآخر من المادة المضادة يظهران إلى الوجود حيث تجولت الفوتونات مرةً. وبينما أنت تنظر، سترى أزواجاً من المادة والمادة المضادة من الإلكترونات تصطدم وتبيد بعضها وتخلق فوتونات أشعة جاما مرة أخرى. تتمتع أزواج هذه الفوتونات بطاقة كافية _تفسرها بالكامل ط= ك×س٢_ لإنشاء جسيمات مثل النيوترونات والبروتونات وشركائها من المواد المضادة، كل منهما أكبر بحوالي ٢٠٠٠ مرة كتلة الإلكترون. فوتونات الطاقة العالية لا تتسكع في أي مكان، لكنها موجودة في بوتقة كونية. بالنسبة لأشعة جاما، فتقريباً أي بيئة أكثر سخونة من بضعة مليارات درجة سوف تعمل جيداً.

الأهمية الكونية للجسيمات وحزم الطاقة المتحولة إلى بعضها البعض مذهلة. حالياً، تبلغ درجة حرارة كوننا المتوسع _التي عُرفت من خلال قياس الفوتونات الميكروية المنتشرة في الفضاء_ هو ٢,٧٣ درجة كلفن فقط. مثل فوتونات الضوء المرئي، الفوتونات الميكروية هي أبرد بكثير من أن تطمح لتتحول إلى جسيمات عبر ط=ك×س٢. بعبارة أخرى، لا يوجد جسيم معروف له كتلة منخفضة بحيث يمكن أن تكون مصنوعة من الطاقة الهزيلة للفوتونات الميكروية. ينطبق الشيء نفسه على الفوتونات التي تشكل موجات الراديو والأشعة تحت الحمراء والضوء المرئي، وكذلك الأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية. وبعبارة أكثر بساطة، فإن تحول الجسيمات كلها يتطلب أشعة جاما. بالأمس كان الكون أصغر قليلاً وأكثر سخونة قليلاً من اليوم. في اليوم الذي سبقه، كان أصغر وأكثر سخونة من الذي قبله. وبالعودة بالزمن إلى الوراء أكثر على ١٣,٧ مليار سنة، فستهبط تماماً في الحساء البدائي بعد الانفجار الكبير، وهو الوقت الذي كانت فيه درجة حرارة الكون عالية بما يكفي لتكون مثيرة للاهتمام من الناحية الفلكية حين كانت أشعة جاما تملأ الكون.

يعتبر فهم سلوك الفضاء والزمن والمادة والطاقة من الانفجار الكبير حتى اليوم هو واحد من أعظم انتصارات الفكر الإنساني. إذا كنت تسعى إلى شرح كامل لأحداث اللحظات المبكرة، عندما كان الكون أصغر وأكثر حرارة من أي وقت مضى بعد ذلك، علينا إيجاد وسيلة لتمكين القوات الأربعة المعروفة للطبيعة _الجاذبية والكهرومغناطيسية والقوى النووية القوية والضعيفة_ أن تتحدث إلى بعضها، لتتوحد وتصبح قوة واحدة فائقة. وعلينا أيضاً إيجاد طريقة للتوفيق بين اثنين من فروع الفيزياء غير المتوافقة حالياً: ميكانيكا الكم (علم الصغير) والنسبية العامة (علم الكبير).

بفضل نجاح زواج ميكانيكا الكم والكهرومغناطيسية خلال منتصف القرن العشرين، تحرك الفيزيائيون بسرعة لمزج ميكانيكا الكم والنسبية العامة في نظرية واحدة متماسكة للثقل الكمي. وعلى الرغم من أن الجهود قد فشلت حتى الآن، فنحن نعلم بالفعل أين تقع العقبات القيمة: خلال (عصر بلانك) وهي المرحلة الكونية التي تصل إلى ١٠^-٤٣ ثانية بعد البداية. ولأن المعلومات

لا يمكنها السفر أسرع من الضوء (٣×١٠^٨ متر في الثانية)، فلا يمكن لأي مراقب افتراضي في أي مكان في الكون خلال عصر بلانك أن يرى أبعد من ٣×١٠^-٣٥ متر. قدم الفيزيائي الألماني ماكس بلانك _الذي سُميت باسمه هذه الأوقات والمسافات الصغيرة جداً_ فكرة الطاقة الكمية في عام ١٩٠٠، وهو عموماً يعتبر أب ميكانيكا الكم.

مع ذلك فلا داعي للقلق لطالما أن الحياة اليومية تمشي. فالصراع بين ميكانيكا الكم والجاذبية لا يشكل مشكلة عملية للكون المعاصر. يطبق علماء الفيزياء الفلكية مبادئ وأدوات النسبية العامة وميكانيكا الكم على فئات مختلفة للغاية من المشاكل. ولكن في البداية _خلال عصر بلانك_ كان الكبير صغيراً، فلا بد من أن يكون هناك نوع من التزاوج بين الاثنين. للأسف، تستمر الوعود المتبادلة خلال هذا الحفل تراوغنا، لذلك لا توجد قوانين (معروفة) للفيزياء تصف بكل ثقة كيف تصرف الكون خلال شهر العسل القصير، قبل أن يجبر الكون المتوسع تفريق ما هو كبير جداً وما هو صغير جداً.

في نهاية عصر بلانك، انفصلت الجاذبية من القوى الأخرى التي بقيت موحدة في الطبيعة، وحققت هوية مستقلة توصف بشكل جيد من قِبل نظرياتنا الحالية. واصل الكون الذي تجاوز عمره ١٠^-٣٥ ثانية التوسع والتبريد، وانفصلت القوى التي بقيت متحدة إلى القوة الكهروضعيفة والقوة النووية القوية. وفي وقت لاحق، انفصلت القوة الكهروضعيفة إلى القوة الكهرومغناطيسية والقوة النووية الضعيفة، فأصبحت أربع قوى متميزة ومألوفة، مع قوة ضعيفة تسيطر على الاضمحلال الإشعاعي، وقوة قوية تُبقي الجسيمات معاً في كل نواة ذرية، وقوة كهرومغناطيسية تعقد الذرات معاً في الجزيئات، والجاذبية التي تُبقي المادة معاً في أحجام كبيرة. في الوقت الذي كان عمر الكون فيه جزء من التريليون من الثانية، كانت قواه المتحولة جنباً إلى جنب مع أحداث حرجة أخرى، قد صبغت الكون بخصائص أساسية، وكل منها يستحق كتابه الخاص.

استمر التفاعل بين المادة والطاقة مع مرور الوقت لأول جزء من التريليون من الثانية الأولى من عمر الكون. قبل وخلال وبعد انقسام القوة القوية والكهروضعيفة، كان الكون يحتوي على محيط يغلي بالكواركات واللبتونات وأشقائهم من المواد المضادة، جنباً إلى جنب مع البوزونات (الجسيمات التي تمكن هذه الجسيمات من التفاعل مع بعضها البعض). ولا يمكن تقسيم أي من عائلات الجسيمات هذه _على حد علمنا_ إلى شيء أصغر أو أكثر أساسيةً. وعلى الرغم من أنها أساسية، فتحتوي كل عائلة من هذه الجسيمات على عدة أنواع. فالفوتونات _بما فيها التي تشكل الضوء المرئي_ تنتمي إلى عائلة البوزونات. واللبتونات الأكثر ألفةً لغير الفيزيائيين هي الإلكترونات و(ربما) النيوترينوات. ولا يوجد كواركات مألوفة لأنها في الحياة العادية نجدها مترابطة معاً في جسيمات مثل البروتونات والنيوترونات. وقد تم تسمية كل نوع من الكواركات

بشكل لا يخدم أي أغراض لغوية أو فلسفية أو تربوية إلا تمييزها عن بعضها: (أعلى) و(أسفل) و(غريب) و(ساحر) و(قمي) و(قاعي).

للكواركات ميزة، على عكس البروتونات التي تملك شحنة كهربية +١، والإلكترونات التي تملك شحنة كهربية -١، فللكواركات شحنات كسرية تأتي في وحدات بقدر ٣/١. باستثناء الظروف الأكثر تطرفاً، فلن تتمكن أبداً من التقاط كوارك منفرد. سيكون على الدوام ممسكاً بواحد أو اثنين من الكواركات الأخرى. في الواقع، فإن القوة التي تحافظ على تماسك اثنين أو أكثر منهم معاً تزداد إذا حاولت فصلهما، كما لو أنها مربوطة معاً بمطاط دون ذري. وإذا فصلت الجزيئات وقطعت هذا الرباط، فإن الطاقة المخزنة فيه تستدعي ط=ك×س^{2} لإنشاء كوارك جديد عند كل نهاية، ليتركك من حيث بدأت.

خلال عصر الكوارك-لبتون في أول جزء من التريليون من الثانية من عمر الكون، كانت كثافة الكون كافية ليكون متوسط مسافة الفصل بين الكواركات المنفصلة مجارياً للمسافة بين الكواركات المرتبطة. وفي ظل هذه الظروف، لا يمكن إقامة ولاءات لا لبس فيها بين الكواركات المتجاورة، لذلك أمكنها التنقل بحرية بين بعضها. وقد أعلن فريق من الفيزيائيين العاملين في مختبرات بروكهافن الوطنية في لونغ أيلاند، للمرة الأولى في عام ٢٠٠٢، عن الكشف التجريبي لهذه الحالة، التي يطلق عليها اسم (حساء الكوارك).

مزيج من الملاحظة والنظرية يشير إلى أن حدثاً قد وقع في الكون المبكر جداً، ربما خلال واحدة من الانفصالات بين أنواع القوى المختلفة، وهبت الكون عدم التماثل الملحوظ حيث فاقت جسيمات المادة جسيمات المادة المضادة بجسيم واحد في المليار وهو الفرق الذي يسمح بوجودنا اليوم. هذا الفرق الضئيل في التعداد كان من الصعب ملاحظته وسط عمليات تكوين وفناء وإعادة تكوين الكواركات والكواركات المضادة، والإلكترونات والإلكترونات المضادة (البوزيترونات)، والنيوترينوات والنيوترينوات المضادة. خلال تلك الحقبة، ظهر الجسيم _الذي رجّح المادة على المادة المضادة_ وحصل له الكثير من الفرص للعثور على جسيمات أخرى يمكن أن يفنى معها، وهذا ما حصل مع كل الجسيمات الأخرى.

ولكن ليس لفترة طويلة. فمع توسع الكون والتبريد، انخفضت درجة حرارته بسرعة لأقل من ١ تريليون درجة كلفن. وقد مر جزء من المليون من الثانية منذ بداية الكون، وهذا الكون الفاتر لم يعد لديه درجة حرارة أو كثافة كافية لطهي الكواركات. وسرعان ما أمسكت جميع الكواركات بشركاء، وكونت عائلة جديدة دائمة من الجسيمات الثقيلة تُسمى هادرونات. وسرعان ما أنتج هذا التحول من كوارك إلى هادرون البروتونات والنيوترونات وكذلك أنواع أخرى أقل ألفة من الجسيمات الثقيلة، وكلها تتألف من مجموعات مختلفة من الكواركات.

انتقلت مسألة عدم التماثل الطفيف بين المادة والمادة المضادة في حساء الكوارك-لبتون إلى هادرونات، مع تبعات غير عادية.

بينما يتبرد الكون، انخفضت كمية الطاقة المتاحة لخلق الجسيمات عفوياً بشكل مستمر. خلال عصر الهادرون، لم تعد الفوتونات تستدعي ط=ك×س^{٢} لتصنيع أزواج الكوارك-الكوارك المضاد: فلم تعد طاقتهم تغطي الـ ك×س^{٢} لهذه الأزواج. وبالإضافة إلى ذلك، فإن الفوتونات التي ظهرت من جميع الإفناءات المتبقية استمرت في فقدان الطاقة للكون المتوسع باستمرار، فانخفضت طاقتها في نهاية المطاف إلى ما دون العتبة المطلوبة لإنشاء أزواج هادرون-هادرون مضاد. فكل مليار إفناء ترك مليار فوتون في أعقابه، لينجو هادرون واحد، شهادةً صامتةً على الزيادة الصغيرة للمادة على المادة المضادة في الكون المبكر. وهذه الهادرونات الوحيدة ستحظى بكل المتعة التي تستمتع بها المادة: ستوفر مصدر المجرات والنجوم والكواكب والناس.

فمن دون عدم التوازن البالغ بليون وواحد إلى بليون بين الجسيمات والجسيمات المضادة، فإن كل الكتلة في الكون _باستثناء المادة المعتمة_ كانت ستبدد قبل أن تمر الثانية الأولى من عمر الكون، ليُترك الكون بلا شيء لنراه _لو كنا موجودين_ سوى الفوتونات ولا شيء آخر.

إلى الآن، قد مرت ثانية واحدة من الوقت.

عند درجة حرارة قدرها ١ مليار درجة بقي الكون حاراً بما يكفي ليطهو الإلكترونات، التي بقيت مع البوزيترونات تظهر إلى الوجود وتفنى. ولكن ضمن الكون الذي يتوسع ويبرد باستمرار، أصبحت أيامهم (ثوانيهم حقيقةً) معدودة. وما كان صحيحاً بالنسبة للهادرونات هو الآن صحيح للإلكترونات والبوزيترونات: فهم يفنون بعضهم، ليظهر إلكترون واحد من كل مليار، الناجي الوحيد من المادة. وأفنيت باقي الإلكترونات والبوزيترونات لتغمر الكون ببحر أكبر من الفوتونات.

بانتهاء عصر فناء الإلكترون-بوزون، جمّد الكون وجود إلكترون واحد لكل بروتون. ومع استمرار تبريد الكون وانخفاض حرارته إلى أقل من ١٠٠ مليون درجة، فإن بروتوناته اندمجت مع البروتونات والنيوترونات الأخرى لتكون أنوية ذرية، وينتج كون فيه ٩٠٪ من الأنوية هي أنوية هيدروجين و١٠٪ هي أنوية هيليوم، إلى جانب أعداد صغيرة نسبياً من الديوتيريوم والتريتيوم والليثيوم.

لقد مرت دقيقتان منذ البداية.

لم يحدث الكثير عبر الـ ٣٨٠ ألف عام التالية لحساء الجسيمات من نوى الهيدروجين ونوى الهيليوم والإلكترونات والفوتونات. طوال مئات ألوف الأعوام هذه بقيت درجة الحرارة الكونية حارة بما يكفي لتجول الإلكترونات حرةً بين الفوتونات، تضرب بها جيئةً وذهاباً.

انتهت هذه الحرية بشكل مفاجئ عندما انخفضت درجة حرارة الكون تحت ٣٠٠٠ درجة كلفن (حوالي نصف درجة حرارة سطح الشمس). في هذا الوقت تقريباً، اكتسبت جميع الإلكترونات مدارات حول النوى، فتشكلت الذرات. يترك تزاوج الإلكترونات مع النوى الذرات التي تشكلت حديثاً داخل مغسل من فوتونات الضوء المرئي، مستكملةً لقصة تشكل الجسيمات والذرات في الكون البدائي.

مع استمرار الكون في التوسع، استمرت الفوتونات في فقدان الطاقة. اليوم، في كل اتجاه ينظر علماء الفيزياء الفلكية، يجدون بصمةً كونيةً من الفوتونات الميكروية بحرارة ٢,٧٣ درجة، وهو ما يمثل انخفاضاً قدره ألف ضعف في طاقة الفوتونات منذ تشكّل الذرات الأولى. إن نمط الفوتونات في السماء _الكمية الدقيقة للطاقة التي تصل من اتجاهات مختلفة_ تحتفظ بذاكرة للتوزيع الكوني للمادة قبل أن تتشكل الذرات. من هذه الأنماط، يستطيع الفيزيائيون الفلكيون الحصول على معرفة رائعة، بما في ذلك عمر وشكل الكون. على الرغم من أن الذرات تشكل الآن جزءاً من الحياة اليومية في الكون، فإن معادلة أينشتاين لا يزال لديها الكثير من العمل للقيام به في مسرع الجسيمات، حيث يتم إنشاء المادة والمادة المضادة من مجالات الطاقة بشكل روتيني. في قلب الشمس، حيث يتم تحويل ٤,٤ مليون طن من المادة إلى طاقة في كل ثانية، وفي نوى جميع النجوم الأخرى.

تنطبق ط=ك×س^{٢} ذاتها بالقرب من الثقوب السوداء، خارج آفق الحدث مباشرةً، حيث تنبثق أزواج الجسيمات والجسيمات المضادة إلى الوجود على حساب طاقة جذب الثقب الأسود الهائلة. وأول من وصف هذا كان عالم الكونيات البريطاني ستيفن هوكنج في عام ١٩٧٥، مبيناً أن الكتلة الكاملة للثقب الأسود يمكن أن تتبخر ببطء بهذه الآلية. وبعبارة أخرى، الثقوب السوداء ليست سوداء تماماً. وتعرف هذه الظاهرة باسم إشعاع هوكنج، وهي بمثابة تذكير مستمر لخصوبة أشهر معادلات أينشتاين.

ليكن نور

مع توسع الكون، انخفضت الطاقة التي يحملها كل فوتون. وفي نهاية المطاف، عندما وصل الكون إلى عمر ٣٨٠ ألف سنة، انخفضت درجة حرارته إلى أقل من ٣٠٠٠ درجة، ونتيجة ذلك، أمكن لبروتونات نوى الهيليوم التقاط الإلكترونات بشكل دائم، وبذلك ظهرت الذرات في الكون. في العصور السابقة، كان لكل فوتون طاقة كافية لكسر ذرة جديدة التشكل، ولكن الآن قد فقدت الفوتونات هذه القدرة، وذلك بفضل التوسع الكوني. مع عدد أقل من الإلكترونات الحرة لتشوش العمل، استطاعت الفوتونات أخيراً السير عبر الفضاء دون الاصطدام بشيء. وذلك عندما أصبح الكون شفافاً، وانقشع الضباب، وتحررت خلفية كونية من الضوء المرئي.

إن طول موجة الفوتون يساوي الفاصل ما بين قمة ذبذبة موجية والقمة التالية لها. تسافر

جميع الفوتونات بنفس السرعة في الفراغ (١٨٦ ألف ميل في الثانية) وتسمى بشكل طبيعي سرعة الضوء، لذلك فللموجات ذات الأطوال الموجية الأقصر عدد أقل من القمم الموجية التي تمر بنقطة معينة كل ثانية. وبالتالي فإن الفوتونات ذات الطول الموجي الأقصر تتذبذب أكثر في فترة زمنية معينة، لذلك سيكون لها ترددات أعلى (أي تذبذب أكثر في الثانية). يوفر تردد الفوتون مقياساً مباشراً لطاقته: فكلما ارتفع تردد الفوتون، كلما ارتفعت الطاقة التي يحملها.

أثناء تبرد الكون، فقدت الفوتونات الطاقة للكون المتوسع. فالفوتونات المولودة بدرجات أشعة جاما والأشعة السينية على الطيف الضوئي تحولت إلى الأشعة فوق البنفسجية والضوء المرئي والأشعة تحت الحمراء. مع نمو أطوال موجاتهم، أصبحوا أكثر برودةً وأقل نشاطاً، لكنها لم تتوقف عن كونها فوتونات. واليوم، بعد ١٣,٧ مليار سنة على البداية، انحرفت فوتونات الخلفية الكونية نزولاً على الطيف لتصبح ميكروية. ولهذا يطلق عليها علماء الفيزياء اسم (الخلفية الميكروية الكونية)، مع أن الاسم الأكثر بقاءً هو (إشعاع الخلفية الكونية). فبعد مليار سنة من الآن، عندما يتوسع الكون ويبرد أكثر، سيصف علماء الفيزياء الفلكية في المستقبل هذه الخلفية باسم (خلفية الموجات الراديوية الكونية).

تنخفض درجة حرارة الكون مع نمو حجم الكون. هذا شيء فيزيائي. مع ابتعاد أجزاء الكون عن بعضها، يجب أن تزيد الأطوال الموجية لفوتونات الخلفية الكونية: يمدد الكون هذه الموجات داخل النسيج المرن للزمكان. ولأن طاقة كل فوتون تتناسب عكسياً مع طول الموجة، فإن جميع الفوتونات الحرة ستفقد نصف طاقتها الأصلية لكل مضاعفة في حجم الكون.

تشع كل الأجسام ذات الحرارة فوق الصفر المطلق فوتونات على جميع أجزاء الطيف الضوئي. ولكن هذا الإشعاع دائماً له ذروة في مكان ما. ذروة إنتاج الطاقة من المصباح الكهربائي المنزلي تكمن في جزء الأشعة تحت الحمراء من الطيف الضوئي، والتي يمكنك الكشف عنها من خلال الدفء على بشرتك. وبطبيعة الحال فإن المصابيح الكهربائية تبعث أيضاً الكثير من الضوء المرئي، وإلا لما اشتريناها. لذلك يمكنك أن تشعر بإشعاع المصباح مثلما يمكنك أن تراه.

تظهر ذروة إشعاع الخلفية الكونية عند طول موجي حوالي ١ ميلليمتر، على نطاق الموجات الميكروية على الطيف الضوئي. التشويش الذي تسمعه على أجهزة الاتصال اللاسلكي تأتي من الموجات الميكروية، منها نسبة مئوية قليلة من إشعاع الخلفية الكونية. أما بقية التشويش فتأتي من الشمس، الهواتف المحمولة، رادارات الشرطة لقياس السرعة، وغيرها. وبالإضافة إلى أن ذروته في الموجات الميكروية، يحتوي إشعاع الخلفية الكونية أيضاً على بعض الموجات الراديوية (التي تسمح له بالتشويش على الإشارات الراديوية الأرضية) والقليل النادر من الفوتونات ذات الطاقة الأعلى من هذه الموجات الميكروية.

في عـام ١٩٦٤، تـم اكتشـاف إشـعاع الخلفيـة الكونيـة عـن غـير قصـد عـن طريـق أرنـو بنزيـاس وروبـرت ويلسـون في مختـبرات بيـل للهاتـف في مـوراي هيـل بنيوجيرسي. وبعـد أكـثر مـن عقـد مـن الزمـان، حصـل بنزيـاس وويلسـون عـلى جائـزة نوبـل لحظهـما الجيـد وعملهـما الشـاق.

يقـدم إشـعاع الخلفيـة الكونيـة لعلـماء الفيزيـاء الفلكيـة أكـثر بكثـير مـن الأدلـة المباشرة عـلى كـون مبكـر سـاخن، وبالتـالي لنمـوذج الانفجـار الكبـير. وتبـين لنـا أن تفاصيـل الفوتونـات المؤلفـة لإشـعاع الخلفيـة الكونيـة يـأتي مُحمّلاً بمعلومـات عـن الكـون قبـل وبعـد أن أصبـح الكـون شـفافاً. لقـد لاحظنـا أنـه حتـى ذلـك الوقـت _حـوالي ٣٨٠ ألـف سـنة بعـد الانفجـار الكبـير_ كان الكـون غـير شـفاف، لذلـك كان مـن غـير الممكـن أن نشـهد تشـكل المـادة حتـى لـو كنـت جالسـاً وسـط الصـف الأمامـي. لم تكـن لـترى العناقيـد المجريـة تبـدأ بالتشـكل. قبـل أن يتمكـن أي شـخص _في أي مـكان_ مـن رؤيـة أي شيء يسـتحق الرؤيـة، كان عـلى الفوتونـات اكتسـاب القـدرة عـلى السـفر دون عوائـق عـبر الكـون. وعندمـا كان الوقـت مناسـباً، بـدأ كل فوتـون رحلتـه عـبر الكـون مـن عنـد النقطـة التـي اصطـدم فيهـا بآخـر إلكـترون مـن شـأنه أن يقـف في طريقـه. وبهـروب المزيـد والمزيـد مـن الفوتونـات دون انعطـاف بسـبب الإلكترونـات (بفضـل انضـمام الإلكترونـات إلى النـوى لتشـكل الـذرات) كوّنـت قـشرة متوسـعة مـن الفوتونـات دعاهـا علـماء الفيزيـاء الفلكيـة (سـطح التشـتت الأخـير). هـذه القـشرة، التـي تشـكلت عـبر فـترة تقـارب المئـة ألـف سـنة، تضـع علامـةً عـلى الفـترة التـي ولـدت فيهـا كل ذرات الكـون تقريبـاً.

وبحلـول ذلـك الوقـت، كانـت المـادة في مناطـق كبـيرة مـن الكـون قـد بـدأت فعليـاً بالتكتـل. حيـث تتراكـم المـادة، تـزداد قـوة الجاذبيـة، مـما يتيـح تكتـل المزيـد والمزيـد مـن المـادة. هـذه المناطـق الغنيـة بالمـادة شـكّلت البـذرة لتشـكيل العناقيـد المجريـة الفائقـة، في حـين بقيـت مناطـق أخـرى فارغـة نسـبياً. وقـد طـورت الفوتونـات التـي تشـتتت عـن آخـر الإلكترونـات داخـل مناطـق التكتـل طيفـاً مختلفـاً أبـرد قليـلاً بينـما تخـرج مـن مجـال الجاذبيـة متزايـد القـوة الـذي سـلبها القليـل مـن الطاقـة.

يُظهـر إشـعاع الخلفيـة الكونيـة بقـع أبـرد وبقـع أحـرّ مـن المتوسـط، وعـادة مـا تكـون بحـوالي جـزء مـن مائـة ألـف مـن الدرجـة. تشـير هـذه البقـع إلى البنـى الباكـرة في الكـون، أول تجمـع للـمادة. ونحـن نعلـم مـا تبـدو عليـه المـادة اليـوم لأننـا نـرى المجـرات والعناقيـد المجريـة والعناقيـد المجريـة الفائقـة. ولمعرفـة كيـف نشـأت تلـك النظـم، نقـوم بسـبر إشـعاع الخلفيـة الكونيـة، الأثـر الرائـع مـن المـاضي البعيـد الـذي لا يـزال يمـلأ الكـون كلـه.

مـن خـلال إضافـة ملاحظـات أخـرى عـن الكـون الموضعـي والبعيـد، يمكـن لعلـماء الفلـك تحديـد جميـع أنـواع الخصائـص الكونيـة الأساسـية مـن إشـعاع الخلفيـة الكونيـة. وبمقارنـة توزيـع أحجـام ودرجـات حـراة المناطـق الأدفـأ والأبـرد، _مثـلاً_ يمكننـا استنتاج قـوة الجاذبيـة في الكـون المبكـر، وبالتـالي مـدى سرعـة تراكـم المـادة. ومـن ذلـك يمكننـا استنتاج كميـة المـادة العاديـة، والمـادة المعتمـة، والطاقـة المعتمـة التـي يتكـون منهـا الكـون (النسـب المئويـة هـي ٤، ٢٣، ٧٣ عـلى التـوالي). مـن هنـا، يسـهل علينـا

معرفة ما إذا كان الكون سيتوسع إلى الأبد، وما إذا كان التوسع سيتباطأ أو يسرع بمرور الوقت.

المادة العادية هي ما يكوّن كل واحد منا. وهي تمارس الجذب ويمكنها امتصاص وبعث والتفاعل مع الضوء. والمادة المعتمة، هي مادة ذات طبيعة غير معروفة تنتج الجاذبية لكنها لا تتفاعل مع الضوء بأي طريقة معروفة. والطاقة المعتمة، تعمل على زيادة تسارع توسع الكون، مُجبرةً الكون على التوسع بأسرع مما كان ليفعل بدونها.

على الرغم من مناطق الجهل العميقة، فاليوم _كما لم يحدث من قبل_ يملك علم الكونيات مرتكزاً. يحمل إشعاع الخلفية الكوني بصمة البوابة التي عبرناها جميعاً من قبل.

لا يحقق أي علم النضج دون بيانات دقيقة. وعلم الكونيات قد أصبح علماً دقيقاً.

ليكن ظلام

تطلب الأمر عقل ألبرت أينشتاين _الأكثر إثارةً وتأثيراً في القرن العشرين_ لإظهار أننا نستطيع أن نَصف بدقة أكبر عمل الجاذبية على مسافة بأنها التواء في نسيج الزمكان أنتجه مزيج من المادة والطاقة. وأظهر أينشتاين أن نظرية نيوتن تتطلب بعض التعديل لوصف الجاذبية بدقة، في التنبؤ _مثلاً_ بالمقدار الذي تنحني فيه أشعة الضوء عند مرورها بجانب جسم ضخم.

تتوافق معادلات أينشتاين بإتقان مع التي نعرفها، التي نراها ونلمسها ونشعر بها وأحياناً نتذوقها.

لا نعرف من هو التالي في سلسلة العباقرة، ولكننا لا نزال ننتظر من أكثر من نصف قرن ليأتي شخص ما ليقول لنا لماذا ينشأ الجزء الأكبر من قوى الجذب التي قسناها في الكون من المواد التي لم نرَها أو نلمسها او نشعر بها أو نتذوقها. أو ربما الجاذبية الزائدة لا تأتي من المادة على الإطلاق، ولكن تنبع من شيء ما آخر. على أية حال، لا نملك أي دليل عن ذلك. ولسنا اليوم بأقرب إلى الجواب مما كنا عليه عندما تم تحديد هذه المشكلة (الكتلة المفقودة) لأول مرة عام ١٩٣٣ من قِبل علماء الفلك الذين قاسوا سرعات المجرات التي تؤثر جاذبيتها على جيرانها القريبين، وقد تم تحليلها بشكل كامل في عام ١٩٣٧ من قِبل الفيزيائي فريتز زويكي.

درس زويكي حركة المجرات داخل عنقود مجري عملاق يقع خارج النجوم الموضعية لدرب التبانة التابعة لكوكبة الهلبة. وهي مجموعة معزولة وغنية بالعديد من المجرات على بعد حوالي ٣٠٠ مليون سنة ضوئية من الأرض. تدور عدة آلاف من المجرات حول مركز العنقود، وتتحرك في كل الاتجاهات مثل النحل الدائر حول القفير. وباستخدام حركات بضع عشرات من المجرات كتتبعات لمجال الجاذبية الرابط للكتلة بكاملها، اكتشف زويكي أن متوسط السرعة مرتفع بشكل صادم. وبما أن قوى الجاذبية الأكبر تحفز سرعات أعلى في الأجسام التي تجذبها، استنتج زويكي

كتلة هائلة لعنقود الهلبة. عندما نجمع كل الكتل المقدرة للمجرات يصنف عنقود الهلبة بين العناقيد المجرية الأكبر والأكثر ضخامة في الكون. ومع ذلك، فإن هذا العنقود لا يحتوي ما يكفي من المادة المرئية لحساب السرعات الملحوظة لمجراته. يبدو أن هناك مادةً مفقودة.

إذا قمت بتطبيق قانون الجاذبية لنيوتن وافترضت أن الكتلة لا وجود لها في حالة غريبة من التوسع أو الانهيار، يمكنك حساب متوسط السرعة المميز الذي يجب أن تكون عليه المجرات. كل ما تحتاجه هو حجم العنقود وتقدير لكتلته الكلية: الكتلة _التي تتحرك عبر المسافات المحددة من قِبل حجم العنقود_ تحدد السرعة التي يجب أن تتحرك بها المجرات لتجنب الوقوع في مركز الكتلة أو الهروب من الكتلة تماماً.

وبحساب مماثل _كما أظهر نيوتن_ يمكنك استنتاج السرعة التي يجب أن يتحرك بها كل كوكب على مسافة معينة من الشمس في مداره. توافق هذه السرعات ظروف الجاذبية التي يجد فيها كل كوكب نفسه. إذا اكتسبت الشمس كتلة أكبر، فستحتاج الأرض وكل شيء آخر في النظام الشمسي إلى سرعات أعلى للبقاء في مداراتها الحالية. ولو تحركت بسرعة كبيرة جداً فإن جاذبية الشمس لن تكون كافية للحفاظ على مدارات الجميع. فإذا كانت سرعة الأرض المدارية أكبر من الجذر التربيعي لضعف سرعته الحالية، فسيحقق كوكبنا سرعة الهروب، وسيهرب من النظام الشمسي. ويمكننا تطبيق المنطق ذاته على الأشياء الأكبر بكثير، كمجرة درب التبانة، التي تتحرك فيها النجوم في مدارات تستجيب لجاذبية جميع النجوم الأخرى، أو في العناقيد المجرية، حيث تشعر كل مجرة بمثل الجاذبية التي تشعر بها جميع المجرات الأخرى.

وعندما نفحص عنقود الهلبة _كما فعل زويكي خلال الثلاثينيات_ نجد أن جميع مجراتها تتحرك بسرعة أكبر من سرعة الهروب للعنقود، ولكن هذا إذا أوجدنا تلك السرعة من مجموع كتلة المجرات مأخوذةً واحدةً واحدة، التي نقدرها من سطوع المجرات. وبالتالي ينبغي أن يتطاير العنقود إلى أشلاء، مما يترك بالكاد أثراً لوجود القفير بعد مرور بضع مئات ملايين السنين أو ربما ملياراً. لكن عمر هذا العنقود يزيد عن العشرة مليارات عام. وهكذا ولد اللغز الذي لا يزال مستمراً في علم الفلك.

خلال العقود التي تلت عمل زويكي، كشفت عناقيد مجرية أخرى نفس المشكلة. فلا يمكن إلقاء اللوم على عنقود الهلبة بكونه غريباً. فمن الملوم إذن؟ نيوتن؟ لا، تم فحص نظرياته لمدة ٢٥٠ سنة واجتازت جميع الاختبارات. أينشتاين؟ لا، إن الجاذبية الهائلة لمجموعات المجرات ليست بما فيه الكفاية لتطبيق النسبية العامة عليها. ربما كانت (الكتلة المفقودة) اللازمة لربط مجرات عنقود الهلبة موجودة، ولكن في شكل غير معروف، شكل غير مرئي. فقد أعاد علماء الفلك مرة أخرى تسمية مشكلة الكتلة المفقودة بـ (مشكلة الضوء المفقود)، بما أن الكتلة يمكن الاستدلال عليها من زيادة الجاذبية. واليوم _ومع تحديد أفضل لكتل العناقيد المجرية_

يستخدم العلماء لقب (المادة المعتمة)، على الرغم من أن (الجاذبية المظلمة) سيكون أكثر دقة.

رفعت مشكلة المادة المعتمة رأسها الخفي مرةً ثانية. في عام ١٩٧٦، اكتشفت فيرا روبين _عالمة الفيزياء الفلكية في معهد كارنيجي في واشنطن_ كتلة مفقودة مشابهة بشكل غير عادي ضمن المجرات الحلزونية نفسها. ودرست سرعات النجوم التي تدور حول مراكز المجرات، وجدت روبين ضمن القرص المرئي لكل مجرة، أن النجوم الأبعد عن المركز تتحرك بسرعة أكبر من النجوم الأقرب إليه. إن هناك مادة أكثر (نجوم ومجرات) بين النجوم الأبعد ومراكز المجرات، وهذا ما يتطلب سرعات أعلى للحفاظ على مداراتها. إلا أنه لا يزال بإمكاننا العثور على بعض السحب الغازية وبعض النجوم المضيئة فيما وراء قرص المجرة المضيء. وباستخدام هذه الأجسام كتتبعات لمجال الجاذبية خارج المجرة _حيث لم تعد المادة المرئية تضاف إلى مجموع الجاذبية، اكتشفت روبين أن سرعاتها المدارية _التي ينبغي أن تنقص مع زيادة المسافة، ظلت في الواقع مرتفعة.

تحتوي هذه المساحات الخالية من الفضاء _المناطق المحيطية من كل مجرة_ على مادة مرئية قليلة جداً لا تفسر هذه السرعة المدارية. وخلصت روبين بشكل صحيح إلى أنه يجب أن يكون هناك شكل ما من أشكال المادة المعتمة في هذه المناطق البعيدة، فيما وراء الحافة المرئية لكل مجرة حلزونية. في الواقع، إن المادة المعتمة تشكّل نوعاً من الهالة حول المجرة بأكملها.

توجد مشكلة الهالة على مقربة منا، تماماً في مجرة درب التبانة. ومن مجرة إلى أخرى، ومن عنقود إلى آخر، فإن المفارقة بين الكتلة في الأجسام المرئية والكتلة الكلية للأنظمة يتراوح بين ضعفين أو ثلاثة أو حتى مئات الأضعاف. عبر كل الكون، تفوق كتلة المادة المعتمة الكونية بحوالي ٦ أضعاف كتلة المادة المرئية.

وهكذا _بأفضل ما يمكننا رؤيته_ فإن المادة المعتمة لا تتكون ببساطة من مادة صادف أن كانت معتمة. بل هي شيء آخر تماماً. فالمادة المعتمة تمارس الجاذبية وفقاً لنفس القواعد التي تتبعها المادة العادية، ولكنها لا تفعل سوى القليل الذي قد يسمح لنا بالكشف عنها. بالطبع نحن عاجزون عن التحليل بسبب عدم معرفتنا بماهية المادة المعتمة. إن الصعوبات التي تكتنف اكتشاف المادة المعتمة _المرتبطة بشكل وثيق بصعوباتنا في إدراك ماهيتها_ تثير السؤال: إذا كانت كل مادة لها كتلة، وكل كتلة لها جاذبية، فهل كل جاذبية لها مادة؟ نحن لا نعرف. إن اسم (المادة المعتمة) يفترض مسبقاً وجود نوع من الجاذبية لا نفهمه بعد. ولكن ربما تكون الجاذبية هي ما لا نفهمه.

في الواقع، تتوافق أماكن وجود المادة العادية والمادة المعتمة. قبل عدة سنوات، قام فريق برئاسة عالم الفيزياء الفلكية الأمريكي ج. أنتوني تايسون بإنتاج أول خريطة تفصيلية لتوزيع جاذبية المادة المعتمة داخل وحول العناقيد المجرية الهائلة. فأينما نرى مجرات كبيرة، نجد

تركيـز أعـلى للـمادة المعتمـة داخـل العنقـود. والعكـس صحيـح: فالمناطـق التـي لا توجـد فيهـا مجـرات مرئيـة تنـدر فيهـا المـادة المعتمـة.

يختلـف التبايـن بـين المـادة المعتمـة والعاديـة بشـكل كبـير مـن بيئـة فيزيائيـة فلكيـة إلى أخـرى، ولكنـه يصبـح أكـثر وضوحـاً بالنسـبة للكيانـات الكبـيرة كالمجـرات والعناقيـد المجريـة. أمـا الأشـياء الأصغـر _كالأقـمار والكواكـب_ فـلا يوجـد أي تبايـن.

هـل يعمـل نـوع مختلـف مـن فيزيـاء الجاذبيـة عـلى مقيـاس المجـرة؟ عـلى الأغلـب لا. عـلى الأرجـح أن المـادة المظلمـة تتكـون مـن مـادة لم نعلمهـا بعـد، تتـوزع في العناقيـد المجريـة أكـثر مـن المـادة العاديـة. وإلا كنـا سـنجد أن جـزءاً مـن كل سـت أجـزاء مـن المـادة المعتمـة لديهـا قطعـة مـن المـادة العاديـة تتشـبث بهـا. وعـلى حـد علمنـا فهـذه ليسـت طريقـة عمـل الأشـياء.

خـلال النصـف الأول مـن المليـون سـنة التـي تلـت الانفجـار الكبـير، وهـو مـا يمثـل لحظـة في تاريـخ الكـون الـذي اسـتمر حـوالي ١٤ مليـار سـنة، بـدأت المـادة في الكـون تتجمـع في النقـط التـي سـتصبح عناقيـد وعناقيـد فائقـة مـن المجـرات. لكـن الكـون آخـذ في التوسـع، وسـيتضاعف حجمـه خـلال نصـف مليـون سـنة. وبالتـالي فـإن اكلـون يسـتجيب لتأثيريـن متنافسـين: الجاذبيـة التـي تريـد أن تكثـف الأشـياء، والتوسـع الـذي يريـد تخفيفهـا. إذا قمنـا بالحسـاب يمكننـا الاسـتنتاج سريعـاً أن جاذبيـة المـادة العاديـة لا يمكنهـا الفـوز بهـذه المعركـة. فهـي بحاجـة مسـاعدة مـن المـادة المعتمـة، التـي بدونهـا سـوف نعيـش _في الواقـع لـن نعيـش_ في كـون بـدون بُنـى: لا عناقيـد مجريـة ولا مجـرات ولا نجـوم ولا كواكـب ولا بـشر. مـا مقـدار الجاذبيـة المُتطلـب مـن المـادة المعتمـة؟ سـتة أضعـاف مـا توفـره المـادة العاديـة. لا يخبرنـا التحليـل بماهيـة المـادة المعتمـة، لكـن فقـط يخبرنـا بـأن آثارهـا حقيقيـة، وحـاول قـدر مـا اسـتطعت، لـن تتمكـن مـن نسـبها للـمادة العاديـة.

لقـد اكتشـفنا أن الجانـب المظلـم مـن الكـون يحتضـن المـادة المعتمـة المحـيرة، التـي يمكـن الكشـف عنـه فقـط عـبر تأثيرهـا الجـذبي عـلى المـادة المرئيـة، ويبقـى شـكلها وتكوينهـا غـير معروفـين تمامـاً. قـد تكـون كميـة متواضعـة مـن هـذه المـادة المعتمـة هـي مـادة عاديـة تبقـى غـير مرئيـة لأنهـا لا تصـدر أي إشـعاع يمكـن الكشـف عنـه. ولكـن الجـزء الأكـبر مـن المـادة المعتمـة هـو مـادة غـير عاديـة، لا تـزال طبيعتهـا تفلـت مـن أيدينـا، باسـتثناء قـوة الجـذب عـلى المـادة المرئيـة.

ليكن مزيد من الظلام

أدت نظريـة النسـبية العامـة بأينشـتاين إلى المعادلـة المفتاحيـة التي كان يسـعى إليهـا، وهـي تلـك التـي تربـط محتويـات الفضـاء وسـلوكه العـام، وبدراسـة هـذه المعادلـة في خصوصيـة مكتبـه، يصنـع نماذجـاً

للكون في عقله، اقترب أينشتاين من اكتشاف توسع الكون، قبل كشف ملاحظات إدوين هابل لذلك.

تتنبأ معادلة أينشتاين الأساسية بأن الكون الذي تتوزع فيه المادة بشكل متساو تقريباً، لا يمكن للفضاء فيه أن يكون ثابتاً. ولا يمكن للكون أن يستقر كما يُصرّ حدسنا وكما تضمنت جميع الملاحظات الفلكية حتى ذلك الوقت. بدلاً من ذلك، يجب على إجمالي الفضاء أن يتوسع أو ينكمش باستمرار: يجب أن يتصرف الفضاء كسطح بالون يُنفخ أو يُفرغ منه الهواء، ولكنه أبداً ليس مثل سطح بالون ثابت الحجم.

أقلق هذا أينشتاين، فلمرة، شعر هذا المُنظِّر الجريء الذي لم يثق في السلطة ولم يتردد أبداً في معارضة أفكار الفيزياء التقليدية أنه ذهب بعيداً جداً. فلم تقترح أي ملاحظات فلكية توسعاً في الكون، لأن علماء الفلك لم يوثقوا إلا حركات النجوم القريبة ولم يحددوا بعد المسافات البعيدة لما نسميه الآن مجرات. وبدلاً من أن يُعلن أينشتاين للعالم أن الكون يجب أن يتوسع أو ينكمش، عاد إلى معادلته، سعياً إلى إيجاد طريقة لتجميد الكون.

وسرعان ما وجد واحداً. سمحت معادلة أينشتاين الأساسية بثابت ولكن غير معروف القيمة يمثل كمية الطاقة في كل سنتيميتر مكعب من الفضاء الفارغ. ولأن لا شيء يشير إلى أن هذا الحد الثابت يجب أن يكون له قيمة معينة، وضع له أينشتاين في البداية قيمة صفرية. ونشر أينشتاين مقالةً علميةً لإثبات أنه إذا كان لهذا الحد الثابت _الذي أسماه علماء الكون فيما بعد بالثابت الكوني_ قيمة معينة، فيمكن للفضاء أن يكون ثابتاً. ثم لن تتعارض النظرية مع ملاحظات الكون، ويمكن لأينشتاين أن يعتبر معادلته صحيحة.

ومع انتهاء عشرينيات القرن الماضي، كان أينشتاين مسروراً لمعرفة اكتشاف هابل لتوسع الكون. ووفقاً لمذكرات جورج جامو، فقد أعلن أينشتاين أن الثابت الكوني كان أكبر أخطائه. باستثناء عدد قليل من علماء الكون واصلوا توسل ثابت كوني غير صفري (بقيمة تختلف عن التي استخدمها أينشتاين) لشرح بعض الملاحظات المحيرة، ومعظمها ثبت في وقت لاحق أنه غير صحيح، تنهد العلماء في جميع أنحاء العالم بارتياح لإثبات أن الفضاء ليس بحاجة لثابت.

أو هكذا ظنوا. فالقصة الكونية العظيمة في نهاية القرن العشرين _والمفاجأة التي قلبت عالَم الكونيات_ كانت تكمن في ذلك الاكتشاف المذهل الذي أُعلن عنه لأول مرة في عام ١٩٩٨، أن الكون يملك ثابت كوني غير صفري. الفضاء الفارغ يحتوي بالفعل على طاقة، سميت (طاقة معتمة)، تمتلك خصائص غير عادية للغاية وتحدد مستقبل الكون بأكمله.

لفهم هذه التأكيدات الدرامية، يجب علينا تتبع المواضيع الحاسمة في فكر علماء الفلك خلال السبعين عاما التي تلت اكتشاف هابل لتوسع الكون. تسمح المعادلة الأساسية لأينشتاين باحتمال انحناء الفضاء، ووصفه رياضياً على أنه إيجابي، أو صفري، أو سلبي. يصف الانحناء

الصفري الفضاء المسطح _النوع الذي تصر عقولنا على أنه الاحتمال الوحيد_ الذي يمتد إلى ما لا نهاية في جميع الاتجاهات، مثل سطح سبورة لانهائية. وعلى العكس من ذلك، فإن الفضاء المنحني إيجابياً يشبه السطح الكروي، سطح ثنائي الأبعاد يمكننا رؤية انحنائه باستخدام البعد الثالث. لاحظ أن مركز الكرة _النقطة التي تبدو ثابتة أثناء توسع السطح ثنائي الأبعاد أو انكماشه_ يكمن في هذا البعد الثالث ولا يظهر على السطح الذي يمثل كل الفضاء.

وكما أن لجميع الأسطح المنحنية الموجبة مساحة محدودة، فإن لجميع الفضاءات المنحنية الموجبة حجم محدود. وللكون المنحني الموجب خاصية وهي أنك إذا سافرت متجهاً خارج الأرض لفترة كافية فإنك ستعود إلى نقطة البداية، مثل ماجلان الذي أبحر حول العالم. وعلى العكس من الأسطح الكروية المنحنية الموجبة، يتوسع الفضاء المنحني السالب إلى ما لا نهاية، مع أنه ليس مسطحاً. إن السطح ثنائي الأبعاد المنحني السالب يشبه سطح سرج كبير بدون نهاية: فهو ينحني صعوداً في اتجاه واحد (من الأمام للخلف) ونزولاً في الاتجاه الآخر (من الجانب للجانب).

إذا كان الثابت الكوني يساوي الصفر، يمكننا وصف الخصائص الكلية للكون برقمين فقط. وأحدهما هو ثابت هابل، يقيس معدل توسع الكون الآن. والآخر يقيس انحناء الفضاء.

يمكن العثور على هذين الرقمين من قياسات دقيقة للسرعات التي تبتعد بها الأجسام التي تتواجد على مسافات مختلفة عنا. الاتجاه الإجمالي بين المسافة والسرعة _المعدل الذي تزداد فيه سرعة ابتعاد المجرات مع زيادة بعدها_ ينتج ثابت هابل، في حين أن الانحرافات الصغيرة عن هذا الاتجاه الإجمالي _والتي تظهر فقط عندما نلاحظ الأجسام على المسافات الأكثر بعداً عنا_ ستكشف عن انحناء الفضاء. وكلما نظر الفلكيون إلى أشياء تبعد مليارات السنين الضوئية عن درب التبانة، فإنهم ينظرون إلى الوراء في الزمن فيرون الكون ليس كما هو الآن، بل كما كان بعدما انقضى وقت أقل بكثير منذ الانفجار الكبير. تسمح ملاحظة المجرات التي تقع على بعد ٥ مليارات سنة أو أكثر من درب التبانة للفلكيين بإعادة بناء جزء كبير من تاريخ الكون المتوسع. على وجه الخصوص، يمكنهم رؤية كيف تغير معدل التوسع مع الوقت، أي مفتاح تحديد انحناء الفضاء. يعمل هذا المنهج _على الأقل من حيث المبدأ_ لأن مقدار انحناء الفضاء يؤدي إلى اختلافات طفيفة في المعدل الذي تغير فيه التوسع الكوني عبر مليارات السنين الماضية.

عملياً، ظل علماء الفيزياء الفلكية غير قادرين على إتمام هذا البرنامج، لأنهم لم يتمكنوا من إجراء تقديرات موثوقة بما يكفي للمسافات إلى العناقيد المجرية التي تبعد عن الأرض عدة مليارات سنة ضوئية. ولكن كان لديهم سهم آخر في جعبتهم. فإذا أمكنهم قياس متوسط كثافة كل المادة في الكون _أي متوسط عدد جرامات المادة لكل سنتيمتر مكعب من الفضاء_

يمكنهم مقارنة هذا العدد مع (الكثافة الحرجة)، وهي قيمة تنبأت بها معادلات أينشتاين في وصف الكون المتوسع. وتحدد الكثافة الحرجة الكثافة الدقيقة المطلوبة لكون بانحناء صفري للفضاء. فإذا كانت الكثافة الفعلية فوق هذه القيمة، فإن الكون له انحناء موجب. في هذه الحالة، بافتراض أن ثابت الكون يساوي الصفر، فإن الكون سيتوقف في النهاية عن التوسع ويبدأ بالانكماش. وإذا كانت الكثافة الفعلية تساوي بالضبط الكثافة الحرجة، أو أقل منها، فسيتوسع الكون إلى الأبد. وتحدث المساواة التامة بين القيم الفعلية والحرجة للكثافة في الكون صفري التقوس، بينما في الكون المنحني السالب، تكون الكثافة الفعلية أقل من الكثافة الحرجة.

وبحلول منتصف تسعينيات القرن الماضي، كان علماء الكون يعلمون أنه حتى بعد إدراج كل المادة المعتمة التي اكتشفوها (من تأثيرها الجذبي على المادة المرئية)، فإن الكثافة الكلية للمادة في الكون لم تصل إلا إلى ربع الكثافة الحرجة. هذه النتيجة ليست بالمدهشة، على الرغم من أنها تعني ضمنا ان الكون لن يتوقف أبدأ عن التوسع، وأن الفضاء الذي نعيش فيه سالب الانحناء. إلا أن هذا يؤلم علماء الكون المتوجهين للمنحى النظري لأنهم اعتقدوا بأن الفضاء يجب أن يكون صفري الانحناء.

اعتمد هذا الاعتقاد على نموذج التضخم للكون. ففي عام ١٩٧٩، افترض آلان جوث أنه خلال اللحظات الأولى من عمر الكون، قام بالتوسع بمعدل سريع بشكل لا يصدق، بحيث ابتعدت الأجزاء المختلفة من المادة بسرعة عن بعضها البعض، لتصل إلى سرعات أعلى من سرعة الضوء. ولكن، ألم تجعل نظرية النسبية الخاصة لأينشتاين سرعة الضوء هي حد السرعة الكونية لجميع الحركات؟ ليس تماماً. فلا ينطبق حد أينشتاين إلا على الأشياء المتحركة داخل الفضاء وليس على توسع الفضاء نفسه. خلال فترة التضخم _التي استمرت فقط من حوالي ١٠$^{-٣٧}$ ثانية إلى ١٠$^{-٣٤}$ ثانية بعد الانفجار الكبير_ توسع الكون بمعامل حوالي ١٠^{٥٠}.

يفسر لنا عصر التضخم لماذا يبدو الكون _في خصائصه العامة_ متماثلاً في كل الاتجاهات: كل شيء يمكننا رؤيته (وأكثر من ذلك بكثير) تضخم من منطقة صغيرة واحدة في الفضاء. لكن هناك ميزةً إضافية تستحق التركيز عليها. التنبؤ المباشر القابل للاختبار: فالفضاء في الكون يجب أن يكون مسطحاً، وليس موجب أو سالب الانحناء، ولكن مسطح تماماً.

وفقاً لهذه النظرية، ينشأ تسطح الفضاء عن التوسع الهائل الذي حدث خلال فترة التضخم. تخيل نفسك واقفاً على سطح بالون، واسمح للبالون أن يتوسع بمعامل كبير جداً بحيث تفقد القدرة على تحديدها. بعد هذا التوسع، سيكون جزء سطح البالون الذي يمكنك رؤيته مسطحاً كالفطيرة. وكذلك الأمر بالنسبة لكل الفضاء الذي يمكننا أن نأمل في قياسه، إذا كان نموذج التضخم يصف فعلاً الكون الحقيقي.

في عام ١٩٩٨ أعلن فريقان متنافسان من علماء الفلك عن ملاحظات جديدة تشير إلى وجود ثابت كوني غير صفري، وهذا يعني أن الكون سيتوسع إلى الأبد بمعدل متزايد باستمرار.

لوكان النظريون هم من اقترحوا كنموذج كوني آخر، لما لاحظ العالم أو تذكروا جهودهم لوقت طويل. ولكن خبراء ذوي سمعة طيبة في رصد الكون الحقيقي، شككوا وفحصوا أنشطة بعضهم، واكتشفوا توافقهم في البيانات وتفسيرها. ولم تقتصر نتائج الرصد على وجود ثابت كوني مغاير للصفر فحسب، بل وحددوا لهذا الثابت قيمةً تجعل الفضاء مسطحاً.

ماذا تقول؟ الثابت الكوني يجعل الفضاء مسطحاً؟

إن التدبر الأكثر نضجاً قد يقنعك بأنه إذا كان الفضاء الفارغ فيما يبدو يحتوي على طاقة، فإن هذه الطاقة يجب أن تساهم في كثافة الكون، تماماً كما تتضمن معادلة أينشتاين ط=ك×س^٢. فإذا حصلت على بعض (ط)، يمكنك تصورها على أنها كمية مكافئة من (ك)، ما يساوي (ط) مقسومة على (س^٢). وبهذا يجب أن تساوي الكثافة الكلية مجموع الكثافة التي تسهم بها المادة، بالإضافة إلى الكثافة التي تسهم بها الطاقة.

إن الكثافة الكلية الجديدة هي ما يجب أن نقارنه بالكثافة الحرجة. فإذا تساوت الاثنتان، يجب أن يكون الفضاء مسطحاً. ومن شأن ذلك أن يوافق تنبؤ نموذج التضخم للفضاء المسطح، لأنه لا يهم ما إذا كانت الكثافة الكلية في الفضاء تنبع من كثافة المادة، أو ما يعادلها من الطاقة في الفضاء الفارغ، أو مزيج من الاثنين.

وقد جاء الدليل الحاسم الذي يشير إلى وجود ثابت كوني غير صفري _بالتالي وجود طاقة معتمة_ من ملاحظات الفلكيين لنوع معين من النجوم المتفجرة أو المستعرات العظمى المسماة1a .

ومع نهاية التسعينات، تنافس فريقا رصد المستعرات العظمى بشدة لاستنتاج (مخطط هابل) الجديد والموسع، وهو الرسم البياني الرئيس في علم الكونيات الذي يرسم مسافات المجرات إزاء السرعات التي تبتعد فيها المجرات عنا. ويحسب علماء الفيزياء الفلكية هذه السرعات من خلال معرفتهم لتأثير دوبلر، الذي يغير ألوان ضوء المجرات بكميات صغيرة تعتمد على سرعات ابتعاد المجرات عنا.

تحدد كل مسافة بُعد وسرعة ابتعاد مجرة نقطةً على الرسم البياني لهابل. بالنسبة للمجرات القريبة نسبياً، فإن هذه النقاط تنتظم وراء بعضها بتناخم، حيث أن كل مجرة تبعد عنا ضعف المسافة التي تبعدها مجرة أخرى تبتعد بضعف سرعة تلك المجرة. ويُعبّر عن هذا التناسب المباشر بين مسافات المجرات وسرعة ابتعادها بتعبير جبري بقانون هابل، وهو المعادلة البسيطة التي تصف السلوك الأساسي للكون: $v = H_o \times d$. هنا v تشير إلى سرعة الابتعاد، وd للمسافة، وH_o هو رقم ثابت، يسمى ثابت هابل، يصف الكون كله في أي وقت معين. وإن درس فضائيون من

كواكب أخرى الكون بعد ١٤ مليار سنة على الانفجار العظيم، سيجدون أن المجرات تبتعد بسرعة تتبع قانون هابل، وكلهم سيستنتجون نفس القيمة لثابت هابل، مع أنهم قد يعطوه اسماً مختلفاً.

هذا الافتراض للديمقراطية الكونية يكمن وراء علم الكونيات الحديث كله. لا يمكننا إثبات أن الكون كله يتبع هذا المبدأ الديمقراطي. ربما بأبعد من أفق رؤيتنا، يتصرف الكون بشكل مختلف عما نراه. لكن علماء الكون يرفضون هذا المنهج، على الأقل بالنسبة للكون المرئي. وفي هذه الحالة يعد القانون $v = H_o \times d$ قانون كوني.

ومع مرور الوقت، يمكن أن تتغير قيمة ثابت هابل، وقد تغيرت. إن مخطط هابل الجديد والمحسن _الموسع ليشمل المجرات البعيدة عدة مليارات من السنين الضوئية_ لن يكشف فقط عن قيمة ثابت هابل، ولكن أيضاً يكشف الطريقة التي يختلف فيها معدل التوسع الحالي للكون عن قيمته منذ مليارات السنين. وسيتم الكشف عن هذه القيمة الأخيرة من خلال تفاصيل المجالات العليا من الرسم البياني، التي تصف نقاطها المجرات الأبعد التي تم رصدها. وهكذا فإن مخطط هابل الذي يمتد إلى مسافات بعدة مليارات من السنين الضوئية سيكشف عن تاريخ توسع الكون، الذي يتجسد في معدل التغير في التوسع.

وفي السعي لتحقيق هذا الهدف، كان من حسن حظ مجتمع الفيزياء الفلكية وجود فريقين متنافسين من مراقبي المستعرات العظمى. وكان لنتائج الدراسة _التي أعلن عنها لأول مرة في فبراير ١٩٩٨_ تأثير كبير لدرجة أنه لم يكن بإمكان أي مجموعة بمفردها أن تنجو من التشكك الطبيعي لدى علماء الكون بالإطاحة بنماذج الكون المقبولة على نطاق واسع. ولتشكك كل فريق من الآخر، بحث كل فريق ببراعة عن أخطاء في بيانات الفريق الآخر أو تفسيره. وعندما أعلنوا بأنهم مقتنعون بمدى حذر وكفاءة الفريق الآخر، فلم يكن أمام مجتمع علماء الكون سوى خيار قبول الأخبار من أقاصي الفضاء.

ماذا كانت تلك الأخبار؟ فقط أن المستعرات العظمى الأكثر بعداً كانت أخفت قليلاً من المتوقع. مما يعني أن المستعرات العظمى أبعد مما يجب أن تكون عليه، مما يدل على أن شيئاً ما جعل الكون يتسع بسرعة أكبر مما ينبغي. ما الذي أثار هذا التوسع الإضافي؟ المتهم الوحيد الذي تناسب مع الحقائق هو الطاقة المعتمة المتوارية في الفضاء الفارغ، الطاقة التي يتوافق وجودها مع قيمة غير صفرية للثابت الكوني. ومن خلال قياس الكمية التي ظهرت بها المستعرات العظمى البعيدة أخفت من المتوقع، قاس فريقا الفلكيين شكل الكون ومصيره.

وعندما حقق فريقا المستعرات العظمى اتفاقاً جماعياً، تبين أن الكون مسطح. لفهم ذلك علينا استخدام القليل من اليونانية. يتطلب الكون ذو الثابت الكوني غير الصفري رقماً إضافياً لوصفه إضافةً لثابت هابل الذي نكتبه H_o للدلالة على قيمته في الوقت الحاضر، ومتوسط كثافة المادة

الذي يحدد وحده انحناء الفضاء إذا كان الثابت الكوني صفراً، نضيف الآن معادل الكثافة التي توفرها الطاقة المعتمة التي تملك ـ من صيغة أينشتاين ط=ك×س^{2}ـ قدراً من الكتلة لأنها تحمل طاقة. ويعبر علماء الكون عن كثافتي المادة والطاقة المعتمة بالرمزين Ω_M وΩ_Λ، حيث يمثل Ω (حرف أوميغا كبير باليوناني) نسبة الكثافة الكونية إلى الكثافة الحرجة. ويمثل Ω_M نسبة متوسط كثافة كل المادة في الكون إلى الكثافة الحرجة، بينما Ω_Λ تمثل نسبة معادل الكثافة التي توفرها الطاقة المعتمة إلى الكثافة الحرجة. هنا يمثل Λ (حرف لامبدا كبير باليونانية) الثابت الكوني، في الكون المسطح ذو الانحناء الصفري، ويساوي مجموع Ω_M وΩ_Λ دائماً ١، لأن الكثافة الكلية (للمادة الفعلية بالإضافة إلى المادة التي توفرها الطاقة المعتمة) تساوي تماماً الكثافة الحرجة.

تقيس ملاحظات المستعرات العظمى من النوع ١a الفرق بين Ω_M وΩ_Λ. تميل المادة إلى إبطاء التوسع في الكون، فالجاذبية تسحب كل شيء نحو كل شيء آخر. وكلما زادت كثافة المادة، زاد سحب الجاذبية من إبطاء التوسع. ولكن الطاقة المعتمة تفعل شيئاً مختلفاً تماماً. فعلى العكس من أجزاء المادة، التي تبطئ قوى الجذب المتبادل بينها توسع الكون، فإن الطاقة المعتمة لديها خاصية غريبة: أنها تميل إلى جعل الفضاء أوسع، وبالتالي تسرع التوسع. ومع توسع الفضاء، تظهر المزيد من المادة إلى الوجود. تميل الطاقة المعتمة الجديدة إلى جعل الكون يتوسع بشكل أسرع. إن قيمة Ω_Λ هي مقياس لحجم الثابت الكوني، وتعطينا حجم الطرق التوسعية للمادة المعتمة. وعندما قاس الفلكيون العلاقة بين المسافات إلى المجرات وسرعات الابتعاد، وجدوا نتيجة المنافسة بين سحب الجاذبية للأشياء معاً ودفع الطاقة المعتمة لهم بعيداً. قدرت القياسات أن Ω_Λ Ω_M = ٠,٤٦، زائد أو ناقص حوالي ٠,٠٣. وبما أن علماء الفلك قد حددوا بالفعل أن Ω_M تساوي ٠,٢٥ تقريباً، فهذه النتيجة حددت Ω_Λ عند حوالي ٠,٧١. وهكذا يرتفع مجموع Ω_M و Ω_Λ إلى ٠,٩٦، وهو قريب من المجموع المُتنبأ به من قبل نموذج التضخم. وقد شحذت النتائج الجديدة الأخيرة هذه القيم فجعلت هذا المجموع أقرب إلى ١.

وعلى الرغم من الاتفاق بين المجموعتين المتنافستين من خبراء المستعرات العظمى، ظل بعض العلماء حذرين. وأخيراً قام جميع المتشككين تقريباً الذين تابعوا كل شاردة وواردة من الاحتمالات الكونية بالتصريح باقتناعهم بعد أن استوعبوا الملاحظات الجديدة من القمر الصناعي المصمم والمُجهز لرصد إشعاع الخلفية الكونية بدقة غير مسبوقة. بدأ هذا القمر الصناعي (WMAP) بإنتاج ملاحظات مفيدة في عام ٢٠٠٢، ومع بدايات عام ٢٠٠٣ تراكمت بيانات كافية لعلماء الكونيات لصنع خريطة لكل السماء المرئية بالموجات الميكروية التي تحمل أغلب إشعاع الخلفية الكونية.

الجانب الأهم والأكثر لفتاً للنظر في هذه الخريطة ـ الذي ظهر أيضاً في ملاحظات المناطيد وسلف WMAP القمر الصناعي مستكشف الخلفية الكونية COBEـ هو أنها تقريباً عديمة

الملامح. فلا يوجد اختلافات يمكن قياسها في شدة إشعاع الخلفية الكونية القادم من جميع الاتجاهات المختلفة حتى نصل إلى دقة جزء في الألف في قياساتنا. وحتى عندها، تظهر الاختلافات الوحيدة القابلة للرؤية كاختلافات قليلة في الشدة، متركزة في اتجاه واحد معين، تقابلها شدة أقل قليلاً، متمركزة في الاتجاه المعاكس. تنشأ هذه الاختلافات عن حركة مجرة درب التبانة بين المجرات المجاورة لها. يسبب تأثير دوبلر إمكانية حصولنا على إشعاع أقوى قليلاً من اتجاه هذه الحركة، وليس لأن الإشعاع هو في الواقع أقوى، بل لأن حركتنا نحو إشعاع الخلفية الكونية يزيد قليلاً من طاقات الفوتونات التي نكتشفها.

وبمجرد أن نعوض تأثير دوبلر، يظهر إشعاع الخلفية الكونية متجانساً تماماً إلى أن نحقق دقةً أعلى بحوالي الجزء في المائة ألف. على هذا المستوى، تظهر انحرافات صغيرة عن التجانس العام. وهي تتبع المواقع التي يصل منها إشعاع الخلفية الكونية بشدة أكثر قليلاً أو أقل قليلاً. كما ألمحنا سابقاً، فإن الاختلاف في الشدة يشير إلى الاتجاهات التي تكون فيها المادة إما أكثر حرارةً بقليل وأكثر كثافة، أو أقل حرارة بقليل وأقل كثافة عن متوسط القيمة بعد ٣٨٠ ألف عام من الانفجار الكبير. كان القمر الصناعي مستكشف الخلفية الكونية COBE أول من رأى هذه الاختلافات. ومن ثم قدم WMAP دقة أفضل في معاينة السماء بأكملها، مما سمح لعلماء الفلك ببناء خريطة مفصلة لشدة إشعاع الخلفية الكونية، رُصدت بدقة زاويّة لا مثيل لها بحوالي درجة واحدة. تُظهر هذه الانحرافات بذور البنى في الكون في الوقت الذي توقف فيه إشعاع الخلفية الكونية عن التفاعل مع المادة. وكانت المناطق الأكثر كثافة بقليل من المتوسط في ذلك الوقت قد بدأت بالانكماش، وكسب المنافسة في الحصول على معظم المادة عن طريق جاذبيتها. وبالتالي أكدت النتائج الأولية من الخريطة الجديدة لشدة إشعاع الخلفية الكونية في اتجاهات مختلفة نظريات علماء الفلك بأن الاختلافات الهائلة في الكثافة من مكان إلى آخر عبر الكون التي نراها الآن تدين بوجودها إلى اختلافات صغيرة في الكثافة وُجدت بعد بضع مئات آلاف السنين على الانفجار الكبير.

لكن يستطيع علماء الفلك استخدام ملاحظاتهم الجديدة لإشعاع الخلفية الكونية لتبيين حقيقة أكثر أساسيةً حول الكون. فالتفاصيل الواردة في خريطة كثافة إشعاع الخلفية الكونية من مكان إلى آخر تكشف عن انحناء الفضاء نفسه. تستند هذه النتيجة المدهشة على حقيقة أن انحناء الفضاء يؤثر على كيفية انتقال الإشعاع عبره. فعلى سبيل المثال، إذا كان للفضاء انحناء موجب، فعندما نلاحظ إشعاع الخلفية الكونية نكون كحالة المراقب من القطب الشمالي الناظر إلى سطح الأرض لدراسة الإشعاع الناتج بالقرب من خط الاستواء. ولأن خطوط الطول تتلاقى عند القطب، يبدو مصدر الإشعاع يمتد بزاوية أصغر مما لو كانت المساحة مسطحة.

لفهـم كيفيـة تأثـير انحنـاء الفضـاء عـلى الحجـم الـزاوي للملامـح في إشـعاع الخلفيـة الكونيـة، تخيـل الوقـت الـذي توقـف فيـه الإشـعاع عـن التفاعـل مـع المـادة. في ذلـك الوقـت كانـت أكـبر الانحرافـات عـن التجانـس في الكـون ذات حجـم يمكـن لعلـماء الكـون حسـابه: عمـر الكـون في ذلـك الوقـت، مضروبـاً في سرعـة الضـوء، قياسـاً حـوالي ٣٨٠ ألـف سـنة ضوئيـة. ويمثـل ذلـك أقـصى مسـافة يمكـن أن تؤثـر فيهـا الجزيئـات ببعضهـا لإنتـاج أي انحرافـات. وعـلى مسـافات أكـبر، لم تصـل (الأخبـار) بعـد مـن الجسـيمات الأخـرى، لذلـك لا يمكـن إلقـاء اللـوم عليهـا في أي انحرافـات عـن التجانـس.

مـا قـدر الزاويـة التـي سـتمتد عليهـا هـذه الانحرافـات القصـوى عـلى السـماء الآن؟ هـذا يعتمـد عـلى انحنـاء الفضـاء، الـذي يمكننـا تحديـده مـن خـلال إيجـاد مجمـوع Ω_M وΩ_Λ. وكلـما اقـترب هـذا المجمـوع مـن ١، كلـما اقـترب انحنـاء الفضـاء مـن الصفـر، وازداد الحجـم الـزاوي الـذي نلاحظـه لأقـصى الانحرافـات عـن التجانـس في إشـعاع الخلفيـة الكونيـة. يعتمـد انحنـاء الفضـاء هـذا فقـط عـلى مجمـوع Ω_s (Ω_M وΩ_Λ)، لأن كلا النوعـين مـن الكثافـة يجعـل منحنـى الفضـاء بنفـس الطريقـة. توفـر ملاحظـات إشـعاع الخلفيـة الكونيـة قياسـاً مبـاشراً لــ $\Omega_M + \Omega_\Lambda$، عـلى العكـس مـن عمليـات رصـد المسـتعرات العظمـى التـي تقيـس الفـرق بـين Ω_M وΩ_Λ.

تظهـر بيانـات WMAP أن أكـبر الانحرافـات عـن التجانـس في إشـعاع الخلفيـة الكونيـة يمتـد لزاويـة حـوالي ١ درجـة، مـما يعنـي ان مجمـوع $\Omega_M + \Omega_\Lambda$ لديـه قيمـة ١,٠٢، زائـد أو ناقـص ٠,٠٢. وهكـذا _في حـدود الدقـة التجريبيـة_ قـد نسـتنتج أن $\Omega_M + \Omega_\Lambda$ = ١، وأن الفضـاء مسـطح. ويمكـن التعبـير عـن نتيجـة ملاحظـات المسـتعرات العظمـى 1a بــ Ω_Λ Ω_M = ٠,٤٦. إذا مزجنـا هـذه النتيجـة مـع الاسـتنتاج أن $\Omega_M + \Omega_\Lambda$ = ١، سـنجد أن Ω_M = ٠,٢٧، وΩ_Λ = ٠,٧٣. مـع تشـكك بنسـبة مئويـة قليلـة في كل رقـم. وكـما ألمحنـا سـابقاً، فـإن هـذه هـي أفضـل التقديـرات الحاليـة للفيزيـاء الفلكيـة لقيـم هذيـن المعاملـين الكونيـين المفتاحيـين، مـا يخبرنـا أن المـادة _العاديـة والمعتمـة_ توفـر ٢٧٪ مـن إجـمالي كثافـة الطاقـة في الكـون، و٧٣٪ توفـره الطاقـة المعتمـة. (إذا كنـا نفضـل التفكـير في المكافـئ للطاقـة مـن المـادة _ط/س^2_ حينهـا فـإن الطاقـة المعتمـة توفـر ٧٣٪ مـن الكتلـة الإجماليـة).

عـرف علـماء الكـون منـذ زمـن طـول أنـه إذا كان للكـون ثابـت كـوني غـير صفـري، فـإن التأثـير النسـبي للـمادة والطاقـة المعتمـة يجـب أن يتغـير بشـكل كبـير مـن مـرور الوقـت. مـن ناحيـة أخـرى، يبقـى الكـون المسـطح ثابتـاً إلى الأبـد، مـن أصلـه في الانفجـار الكبـير إلى المسـتقبل اللامتناهـي الـذي ينتظرنـا. في الكـون المسـطح، مجمـوع Ω_M وΩ_Λ يسـاوي دائمـاً ١، لذلـك فـإذا تغـير واحـد منهـم، يجـب أن يتغـير الآخـر لتعويضـه.

خـلال الفـترات الكونيـة التـي تلـت مبـاشرةً الانفجـار الكبـير، كانـت الطاقـة المعتمـة بالـكاد تنتـج أي تأثـير عـلى الكـون. فلـم يكـن هنـاك سـوى فضـاء صغـير جـداً _بالمقارنـة مـع الفـترات اللاحقـة_ وكانـت قيمـة Ω_Λ فـوق الصفـر بقليـل، في حـين كانـت قيمـة Ω_M تحـت الواحـد بقليـل.

في تلك الأيام القديمة، تصرف الكون بطريقة مماثلة تماماً لكون بدون ثابت كوني. ومع مرور الوقت، انخفض Ω_M وارتفع Ω_Λ باطراد، محافظين على مجموع ثابت هو ١. وأخيراً -وبعد مئات المليارات من السنين من الآن- سينزل Ω_M إلى ما يقارب الصفر، سيرتفع Ω_Λ إلى ما يقارب الشمول. وهكذا، فإن تاريخ الفضاء المسطح ذو الثابت الكوني غير الصفري ينطوي على تحول من سنواته الأولى، منذ أن كانت الطاقة المعتمة بالكاد تُذكر، مروراً بالفترة الحالية، حيث يملك كل من Ω_M وΩ_Λ قيماً تقريباً متساوية، وإلى المستقبل البعيد اللانهائي، عندما ستنتشر المادة بتوزع كبير عبر الفضاء حيث تصبح Ω_M تقترب من الصفر أكثر فأكثر، مع أن مجموع الاثنين Ω_s يبقى مساوياً ١.

يُعطي استنتاج ملاحظات مقدار الكتلة الموجودة في العناقيد المجرية الآن لـ Ω_M قيمة حوالي ٠,٢٥، في حين أن ملاحظات إشعاع الخلفية الكونية والمستعرات العظمى البعيدة قيمة قريبة من ٠,٢٧. وفي حدود الدقة التجريبية تتوافق هاتان القيمتان. وإذا كان الكون الذي نعيش فيه له ثابت كوني غير صفري، وإذا كان هذا الثابت مسؤولاً (بالإضافة إلى المادة) عن إنتاج الكون المسطح الذي يتنبأ به نموذج التضخم، يجب أن يكون للثابت الكوني قيمة تجعل Ω_Λ يساوي أكثر قليلاً من ٠,٧ -أي أكثر بمرتين ونصف من قيمة Ω_M. وبعبارة أخرى، يجب أن يقوم Ω_Λ بأغلب العمل لجعل $(\Omega_\Lambda + \Omega_M)$ يساوي ١. وهذا يعني أننا قد مررنا بالفعل من العصر الكوني الذي ساهمت فيه المادة والثابت الكوني بالقدر نفسه (حيث ساهم كل واحد منهما بـ ٠,٥) للحفاظ على تسطح الفضاء.

وما لم يثبت في النهاية أن مجموعة الملاحظات قد أسيء تفسيرها أو أنها غير دقيقة، علينا أن نقبل بأن الكون لن ينكمش أو يعيد دورة حياته. بدلاً من ذلك، يبدو المستقبل قاتماً: مائة مليار سنة من الآن، عندما تكون معظم النجوم قد أحرقت نفسها، كل شيء ما عدا المجرات القريبة سيختفي وراء أفق رؤيتنا.

وبحلول ذلك الوقت، فإن درب التبانة ستتّحد مع أقرب جيرانها، تخلق مجرة واحدة عملاقة حيث لا مكان حرفياً. ستحتوي سماؤنا ليلاً على نجوم مدارية (ميتة وحية) ولا شيء آخر، لتترك لعلماء الفلك المستقبليين كوناً قاسياً. فبدون مجرات لتتبّع التوسع الكوني، سوف يستنتجون خطأً أننا نعيش في كون ثابت. وسيطور الثابت الكوني وطاقته المعتمة الكون إلى نقطة لا يمكن فيها قياسهما أو حتى الحلم بهما.

فتمتع بعلم الكون بينما يمكنك ذلك.

ومنذ عهد بعيد كان وجه العالم ممسوحاً لاتتميز فيه أجزاء عن أجزاء...

فلم يكن هناك ما يرى، ولا مايزار، ولا مايدل على الطريق. فكانت وحدة وفراغاً موحشاً أكثر من الموت، بل لم يكن هناك حتى ما يمكن أن يموت.

بداية الكون

جون فايفر

الفصل الرابع

المجرات

المجرات المتلألئة [٢]

كما أوضحنا فيما سبق، أصبح الكون شفافاً بعد مرور ٣٠٠ ألف عام على الانفجار الكبير. وتكونت السحب الهائلة من الهيدروجين والهيليوم التي تناثرت إلى تريليون سحابة منفصلة. ومع برود الكون بدأت تتحول كل سحابة منفصلة من الهيدروجين والهيليوم إلى نجوم ومجرات بفعل الجاذبية التي عملت على تصادم ذرات الهيدروجين، حيث تولد عن هذا الاحتكاك والتصادم حرارة أدت لالتحام ذرات الهيدروجين مكونةً الهيليوم. فأطلقت هذه الالتحامات كميات ضخمة من الطاقة _وفق معادلة أينشتاين ط=ك×س^{٢}_ ومع بدء هذا الالتحام بدأت تتحول ملايين الأطنان من المادة إلى طاقة كل ثانية، وهكذا ولدت النجوم.

تختلف أحجام النجوم وكثافتها بشكل واسع، كما أنها تتطور مع الزمن من نوع لآخر.

وشمسنا الآن هي نجم يحرق الهيدروجين بالاندماج لينتج الهيليوم، وبعد استهلاكها لمخزونها من الهيدروجين _وهو ما سيحدث بعد عدة مليارات من السنين_ فستبدأ باستهلاك الهيليوم بنفس الطريقة. وبما أن اندماج الهيليوم أشد حرارةً من الهيدروجين منتجاً لكميات أكبر من الطاقة، فسيعمل الضغط الناتج عن الطاقة الإضافية على تمدد الشمس لتصبح ما يسمى عملاقاً أحمر. وعند استهلاكها لوقودها من الهيليوم فسينهار العملاق الأحمر ليصبح قزماً أبيض، الذي سيتبرّد ببطء إلى أن يصبح رماداً يسمى قزم أسود، وهو بحجم الأرض تقريباً وكتلته تصل إلى ٢٠٠ ألف ضعف كتلة الأرض. ولم يُكتشف حتى الآن أي قزم أسود لأن الكون ليس قديماً بما فيه الكفاية لاستكمال عملية التبريد البطيئة هذه.

وبعض النجوم التي بدأت بحجم أكبر من شمسنا، فستصبح عملاقاً أحمر أكبر حجماً، وبنهاية فترة العملاق الأحمر لا تنهار لقزم أبيض. فقد تشكّل فيها عناصر أثقل كالكربون والنتروجين والأوكسجين والمغنيسيوم وفي النهاية الحديد. والحديد لا يمكن استخدامه كوقود نجمي، وعنده يتوقف إنتاج الطاقة وتسيطر الجاذبية على الوضع. فينفجر لب النجم، مما يؤدي إلى انفجار

---

٢ (٥) Brown, Cynthia: Big History (From the big bang to the present).

داخلي يؤدي إلى تفجير هائل في الطبقات الخارجية يدمر معظم النجم إلى قطع صغيرة، ليبقى القلب مكوّناً لنجم نيوتروني (بحجم صغير وكثافة عالية) أو ثقب أسود، وهو جسم كثيف لدرجة أن الضوء لا يستطيع الهرب من جاذبيته. ويسمى انفجار النجم هذا بالمستعر الأعظم (supernova)، ولا تصل له إلا النجوم التي تزيد كتلتها عن كتلة شمسنا بست مرات.

تتحول النجوم المستعرة الهائلة لثقوب سوداء. والثقوب السوداء الأصغر _التي حجمها بين ثلاث إلى ست كتل شمسية_ تنفجر إلى الخارج بدلاً من أن تنفجر إلى الداخل. وفي نواتها يندمج الهيدروجين إلى هيليوم، ثم الهيليوم إلى الكربون. فتنصهر النوى إلى نوى أكبر مما سبق _كالأوكسجين والكالسيوم_ وهكذا عبْر كل الجدول الدوري للعناصر. وفي وقت معين يحدث انفجار، مما ينقل معظم النجم إلى الفضاء مرةً أخرى على هيئة غاز _لكنه الآن يحتوي على مكونات معقدة_ تدعم ذراته نشأة الحياة، ليست مجرد هيدروجين وهيليوم. فقط المستعرات العظمى يمكنها تصنيع عناصر أعلى من الحديد. تدريجياً _على مدى حوالي ٩ مليارات سنة_ تم بناء جميع عناصر الجدول الدوري بهذه الطريقة. فكل كسرة ذهب على كوكبنا نشأت في النجوم العملاقة التي انفجرت قبل أن تولد الشمس. إن الذهب الذي في خاتمك يزيد عمره على ٤,٥ مليار سنة. وهكذا فإن انفجارات النجوم صنعت العناصر التي جعلت الحياة ممكنةً على الأرض. حرفياً، نحن مصنوعون من غبار النجوم.

وبالعودة إلى قصتنا، بعد مئات آلاف السنين على الانفجار الكبير، تماسكت المجرات بتحرك موجات الكثافة عبر الفضاء، مصادمةً سحب الهيدروجين والهيليوم التي شكلت النجوم. وبدأ الفضاء بالتلألؤ. وأخذت معظم المجرات شكل الحلزون، لكن في وقت مبكر من عمر الكون كانت المادة مزدحمة، وكثيراً ما تصادمت المجرات ببعضها. وضمت المجرات الكبيرة إليها المجرات الصغيرة، ولكن المجرات الكبيرة لم تعد تقدر على التماسك بشكلها اللولبي. فأصبح شكلها كروياً أو بيضاوياً وسُميت المجرات البيضاوية. وهي مجرات لا تنتج نجوماً جديدة، لأن موجات الكثافة لا تتحرك خلالها لتصادم السحب الغازية لتشكل نجوماً جديدة. ومجرتنا درب التبانة هي مجرة حلزونية مثالية، لصدفة سعيدة أوجدتها في منطقة غير مزدحمة من الكون المبكر منذ حوالي ١٢ مليار سنة.

ولحوالي ٩ مليارات سنة _ما يعادل أول ثلثين من عمر الكون حتى الآن_ كان الكون يتألف من ألعاب نارية سماوية لا يمكن تصورها. دارت المجرات وتصادمت. وتدفقت موجات الكثافة عبر المجرات، مما تسبب في ظهور نجوم جديدة. وانفجرت مستعرات عظمى، ناشرةً عناصر غازية جديدة جاهزة للتصادم لتشكيل نجوم جديدة بواسطة مستعرات عظمى أخرى أو تنفجر فتنهار داخلياً إلى ثقوب سوداء، لتفقد مادتها إلى حيث لا نعلم. وخلال تلك الفترة كلها كان الفضاء يتوسع ويتبرّد. فقد كان الفضاء رقصةً متألقةً من الموت والبعث.

أصل المجرات [٣]

يقول الفهم النظري للطريقة التي بدأ بها الكون في التوسع خلال مرحلة الكرة النارية حين كانت المادة الباريونية والإشعاع مرتبطين معاً، عَبر الفضاء على نحو متقطع موجات صوتية من جميع الأطوال الموجية وصولاً إلى الحد الذي وضعته سرعة الضوء. وبعد الانفصال، بقي الإشعاع يحمل بصمةً للنمط الذي صُنع من قِبل الموجات الصوتية، في حين استقرت المادة الباريونية في كتل من المادة جُمعت معاً بسبب الجاذبية. وباستخدام تقنيات إحصائية لتحليل نمط المجرات التي شوهدت في الكون المحيط بنا، أصبح بإمكان علماء الفلك الكشف عن توقيع هذه الموجات الصوتية (ما يسمى «قمم صوتية») في توزيع المادة نفسها.

في عام ٢٠٠٥، أفاد فريقان يستخدمان تحليلات مختلفة أن الاختلافات الإحصائية في توزيع المجرات التي تظهر في المسوح الكبيرة ثلاثية الأبعاد تُظهر بصمة هذه الموجات الصوتية من الانفجار الكبير. رصدياً، كل شيء متناسب. ولكن المحاكاة الحاسوبية تخبرنا أنه كان من المستحيل على بنى كبيرة مثل تلك التي نراها في الكون اليوم أن تنمو من التموجات الموجودة في الكرة النارية للانفجار الكبير في الوقت المتاح منذ حدوثه، إذا كان الشيء الوحيد الذي يسحب المادة الباريونية إلى التكتّل هو جاذبيتها الخاصة. الغاية هنا هي أنه على الرغم من أن الموجات الصوتية قد تكون كبيرة بامتلاكها لطول موجي طويل، إلا أنها كانت ضحلة جداً، وهي مجرد تموجات في البحر الكوني.

فالحاجة إلى بعض التأثيرات الجذبية لا يمكن أن تكون مفاجئةً، فقد سبق وناقشنا أدلة المادة المعتمة. لكن هذا دليل مختلف تماماً على وجود المادة المعتمة، والمحاكاة الحاسوبية متطورة جداً بحيث يمكن أن تخبرنا بالضبط عن كمية المادة المعتمة الباردة التي نحتاجها.

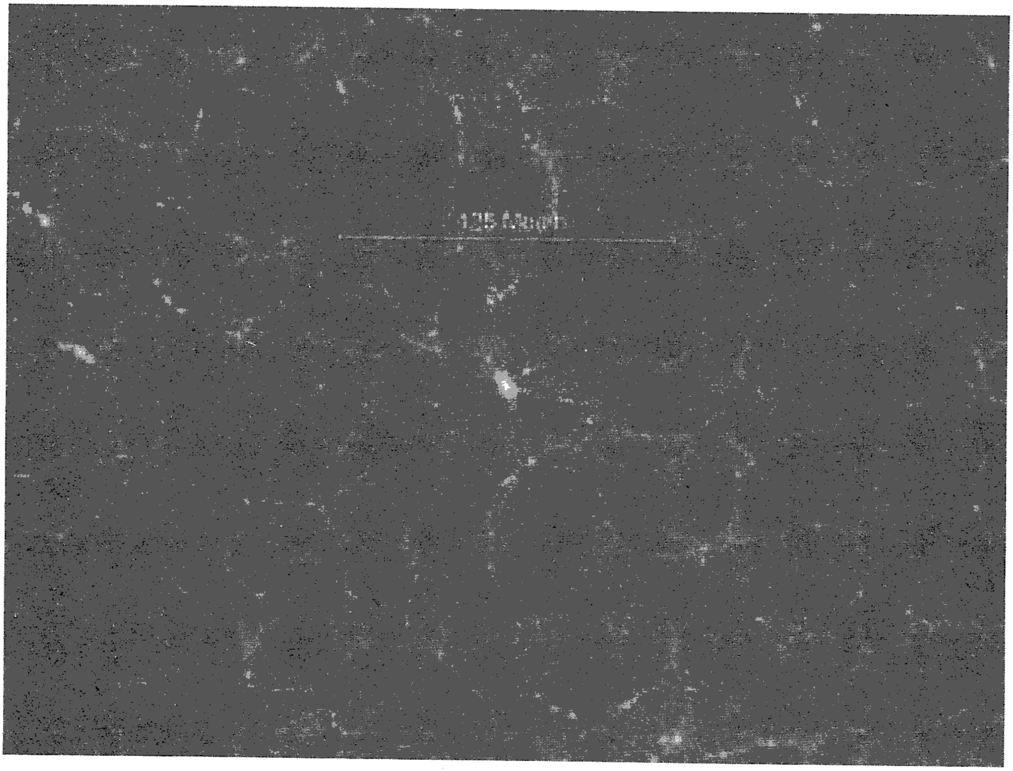
تستغرق هذه العملية الكثير من وقت الكمبيوتر. فللحصول على المحاكاة المبينة في الشكل التالي، عملت مجموعة من أجهزة كمبيوتر يونيكس مستخدمةً ٨١٢ معالجاً مع اثنين تيرابايت من الذاكرة وتؤدي ٤,٢ تريليون عملية حسابية في الثانية لعدة أسابيع. إجمالاً، أنتجت المحاكاة سلسلة من ٦٤ لقطة لنموذج الكون في مراحل مختلفة من تطوره، مقابِلة لأوقات مختلفة منذ الانفجار الكبير وتبلغ ذروتها في الوقت الحاضر.

والنتائج واضحة، تبدو المحاكاة إحصائياً تماماً مثل الكون الحقيقي. وهي تمثل الفئة الوحيدة من هذه النتائج التي تبدو هكذا. بدءاً من نمط الانحرافات المرئية في إشعاع الخلفية الميكروي، فنمط توزيع المجرات التي نراها اليوم في الكون لا يمكن أن تنتج في ١٣ مليار سنة إلا إذا كان الكون مسطحاً، وكان قدر المادة المعتمة الباردة أكبر ٦ مرات من المادة الباريونية، يساهم الثابت الكوني بنحو ٧٣٪ من كثافة كتلة الكون. هذا _بطبيعة الحال_ نموذج لامبدا للمادة

---

٣ (Gribbin, John: Galaxies (A very short introduction ○).

المعتمة الباردة (Λ CDM) الفائق النجاح. ومفتاح تشكل البنى المرئية هو أنه حالما فُصلت المادة الباريونية عن الإشعاع وأصبحت حرة في الذهاب في طريقها الخاص، فإن في مناطق الكون المبكر حيث كان هناك بالفعل كثافة أكبر قليلاً من المادة المعتمة، سحبت هذه المادة الغاز الباريوني القريب إلى أخاديد جذبية نظيرة، حيث أصبحت سحب الغاز كثيفة بما فيه الكفاية للانهيار وتشكيل المجرات والنجوم، الموزعة في نمط رغوي عبر الكون. في الفراغات المظلمة بين الخطوط المشرقة لا تزال هناك تقريباً نفس الكثافة من الباريونات والمادة المعتمة الباردة، وتحتاج فقط لتموج صغير هنا وهناك لخلق الظروف اللازمة لانهيار سحب الغاز.



(محاكاة توزيع المادة في الكون المتوسع الموصوف في النص. وهذا يتطابق بشكل وثيق مع التوزيع الملحوظ للمجرات)

ويمكن تغيير تشبيه شبكة الطرق السابق، بأن نعتبر الخيوط المشرقة كالأنهار المتدفقة على طول الباريونات. هذا هو الإطار الذي يعتقد علماء الفلك الآن فيه أنهم يمتلكون فهماً جيداً للطريقة التي تشكلت فيها المجرات الفردية.

بعد الانفصال مباشرةً، كانت المادة الباريونية لا تزال أكثر حرارةً من أن تستطيع الانهيار حتى في وجود المادة المعتمة. ولكن المادة المعتمة _كونها باردة_ بدأت بالانهيار فوراً في الأماكن التي كانت فيها الكثافة أعلى قليلاً من المتوسط. وبعد حوالي ٢٠ مليون عام على الانفجار الكبير _

وهو ما يعادل انزياح أحمر بحوالي ١٠٠_ كان الكون لا يزال متجانساً جداً، ولكن جزيئات المادة المعتمة الباردة كانت قد بدأت في سحب بعضها إلى كتل بفعل الجاذبية وقادرةً على إمساك المادة ضد التوسع الخارجي للكون. وانطلاقاً من نوع التموجات الموجودة في إشعاع الخلفية، كان يمكن للمادة المعتمة بإزاحة حمراء حوالي ٢٥ إلى ٥٠ تشكيل كتل تحتوي على نفس كتلة الأرض ولكن بحجم كبير كنظامنا الشمسي. تتركز معظم كتلة هذه السحب الكروية بالقرب من المركز، وكانت السحب التي تشكلت بهذه الطريقة لها تأثير جذبي قوي بما فيه الكفاية على بعضها البعض فقاومت التوسع الكوني وشكلت العناقيد وعناقيد العناقيد وهكذا في بنية هرمية (من أسفل إلى أعلى). وذلك أدى إلى تدفق المواد الباريونية إلى أعلى تركيزات الكتلة، مشكّلةً النجوم ثم المجرات في عُقد التقاء الخيوط أثناء فعل ذلك، وإنتاج (الطريق السريع الكوني) الخيطي للكون.

كانت الأجسام الساطعة الأولى التي ظهرت في الكون هي نجوم ضخمة، بين عشرات ومئات المرات من حجم الشمس. وهذا مختلف جداً عن النجوم التي حولنا اليوم، لأنها كانت تحتوي فقط على الهيدروجين والهيليوم المُنتجين في الانفجار الكبير، بدون وجود أي من العناصر الثقيلة. كانت النظم الأولى لتشكل النجوم جزءاً من بنية خيطية موضعية أصبحت تدريجياً مكوناً فرعياً لبنية خيطية أكبر تمتد بطريقة هرمية عبر الكون، ولا تزال في تطور بالتدفق معاً في خيوط كعناقيد مجرية وعناقيد مجرية فائقة. وتشير النماذج إلى أن المناطق النجمية ظهرت بعد حوالي ٢٠٠ مليون سنة من الانفجار الكبير، ويحتوي كل منها على ما بين مائة ألف ومليون مرة كتلة الشمس، بحجم بين ٣٠ و١٠٠ سنة ضوئية، وهي مماثلة في الحجم لسُحب الغاز والغبار التي تتشكل فيها النجوم اليوم في درب التبانة. ولكن هذه السحب تألفت أساساً من المادة المعتمة.

تشير المحاكاة لطريقة تشكيل الباريونات للنجوم في مثل هذه السحب إلى أن بنية خيطية _شبيهة بالبنية الخيطية الأوسع نطاقاً_ تطورت داخل كل سحابة، مع تركيز المادة في عُقد الخيوط. ومع ازدياد الكثافة، أصبحت الاصطدامات بين الذرات أكثر شيوعاً، وكانت بعض ذرات الهيدروجين قد جُمعت معاً فصنعت جزيئات الهيدروجين. هذه الجزيئات قامت بتبريد الغاز داخل السحابة عن طريق انبعاث الأشعة تحت الحمراء، وستفعل جزيئات الهيليوم نفس الشيء ولكن بكفاءة أقل. وكان هذا التبريد هو الذي سمح للغاز الباريوني بأن ينهار في السحابة أكثر فأكثر ليكون النجوم الأولية، مما أدى إلى فصل الباريونات إلى حد ما عن المادة المعتمة.

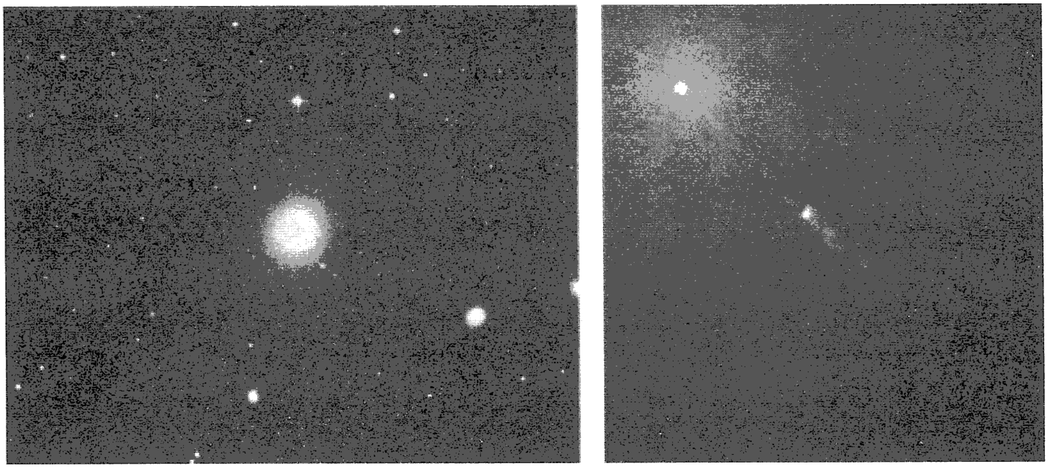
في مناطق تشكل النجوم اليوم، تعمل عملية التبريد بكفاءة أكبر بفضل وجود عناصر أثقل، وهذا هو السبب في أن الغيوم قادرة على الانهيار بالقدر الذي تفعله قبل تشكل النجوم. ولكن في السحب البدائية المكوّنة للنجوم حدث كل شيء عند درجة حرارة أعلى، مما أدى إلى أن العُقد الأولى المكوّنة للنجوم في السحابة كانت لا تزال كتلتها تتراوح بين بضع مئات إلى ألف كتلة شمسية. وكما هو الحال بالنسبة لتشكل النجوم اليوم، كان من الصعب جداً على هذه الغيوم

أن تتفتت، ولم تشكل كل سحابة إلا عدداً قليلاً (ربما لا يزيد عن ثلاثة نجوم)، مع بعض الكتلة التي تبددت مع ارتفاع حرارة النجوم الأولية.

كانت النتيجة هي أول مجموعة من النجوم (يطلق عليها بشكل محيّر اسم «Population III» امتداداً للتسمية التقليدية للنجوم في مجرتنا) بكتل تبلغ عادةً بضع مئات المرات من كتلة الشمس ودرجات حرارة سطحها حوالي ١٠٠,٠٠٠ K (درجة كلفينية)، تشعّ بشكل قوي في الجزء فوق البنفسجي من الطيف الضوئي. هذا الإشعاع _الذي ملأ الكون في وقت مبكر_ لا يزال مرئياً اليوم، ولكن نتيجةً للإزاحة الحمراء فهو وهج من الأشعة تحت حمراء كشف عنه تلسكوب الفضاء سبيتزر.

وعلى الرغم من أن النجوم الأولى كانت مشرقة، إلا أنها كانت قصيرة الأجل. يتناسب عمر النجم عكسياً مع كتلته، لأن النجوم الضخمة يجب أن تحرق وقودها بشكل أكبر لتحافظ على نفسها ضد وزنها. وفي غضون بضعة ملايين من السنين _لا نزال فقط بعد ٢٠٠-٢٥٠ مليون عام من الانفجار العظيم_ والنجوم التي بدأت بكتل ما بين ١٠٠ إلى ٢٥٠ مرة كتلة الشمس قد انفجرت تماماً في نهاية حياتها، لتنشر بذلك موادها في جميع أنحاء السحب الغازية المحيطة بها. وشملت هذه المواد العناصر الثقيلة الأولى، مما جعل التبريد أكثر كفاءة عند تشكل الجيل التالي من النجوم، مما مكن تكثفات تشكل النجوم في المناطق التي أدت إلى الانهيار بفعل موجات انفجار النجوم لتصبح أصغر بكثير وتشكل أوائل النجوم المماثلة لتلك الموجودة في درب التبانة اليوم. في الواقع، بعض من نجوم الجيل الثاني هذه موجودة في مجرتنا. وتم حساب أن أقدم نجوم Population II يزيد عمرها عن ١٣,٢ مليار سنة، بالتالي فقد تشكلت في غضون حوالي ٥٠٠ مليون سنة من الانفجار الكبير.

النجوم التي تزيد كتلتها عن كتلة الشمس بحوالي ٢٥٠ مرة لا تتمزق تماماً عند انفجارها. بل تنهار معظم المواد التي تحويها لتكوّن ثقباً أسوداً. هذه النجوم البدائية تشكلت في أكثف تركيزات المادة في الكون في ذلك الوقت، لذلك فمن المرجح أن الثقوب السوداء كانت قريبة بما فيه الكفاية من بعضها لتندمج وتنمو إلى أجسام هائلة الضخامة. لا نستطيع أن نكون متأكدين تماماً من أين أتت الثقوب السوداء هائلة الضخامة الموجودة في قلوب المجرات اليوم، ولكن على الأقل يبدو ممكناً أن هذا الاندماج للثقوب السوداء التي خلّفها الجيل الأول من النجوم بدأ عملية تشكل الثقوب السوداء هائلة الضخامة بالتغذية على المادة المحيطة به.



(ثقب أسود نشط)

تظهر ملاحظات النجوم الزائفة (quasars) عند إزاحات حمراء بحوالي ٦,٥ أن ثقوباً سوداء ذات كتلة أكثر بمليار مرة على الأقل من كتلة الشمس قد تشكلت قبل أن يبلغ الكون مليار سنة. هذه أمثلة كبيرة بشكل استثنائي، وهذا هو السبب في أن تلك النجوم الزائفة لامعة بما فيه الكفاية ليتم رؤيتها بنظرة إلى الوراء في الزمن بما يقارب ١٣ مليار سنة ضوئية، ولكنها تؤكد السرعة التي ظهرت بها المجرات. وتُظهر المحاكاة أنه يجب أن يكون هناك العديد من الثقوب السوداء الأصغر أيضاً، تشكّل النوى التي نمت منها المجرات؛ كل ثقب أسود يرسخ ربما في هالة تحتوي على ألف مليار كتلة شمسية من المواد. تسقط المادة الباريونية في الثقب الأسود، فتحرر طاقة الجاذبية لتزود النجوم الزائفة ونوى المجرات النشطة الأخرى بالطاقة، في حين تشكلت النجوم في المناطق الخارجية الأهدأ لما أصبح لاحقاً مجرة عندما استقرت المادة الباريونية؛ ولكن المحاكاة تُظهر أيضاً أن أعداداً كبيرة جداً من سحب المادة المعتمة التي بقدر كتلة الأرض يجب أن تكون قد نجت من كل هذا الاضطراب حتى يومنا هذا، وأنها لا تزال موجودة في هالة المادة المعتمة حول المجرات. ويُقدّر أنه قد يكون هناك ألف تريليون (10^{15}) من هذه الأجسام في هالة مجرتنا وحدها.

وتبين الحسابات أن العملية التي وصفتُها يمكن أن تشكل جسماً بحجم درب التبانة في الوقت المتاح _بضعة مليارات عام_ شريطة أن يكون للثقب الأسود المركزي كتلة لا تقل عن مليون كتلة شمسية. ولحسن الحظ، تكشف الملاحظات أن كتلة الثقب الأسود في قلب درب التبانة تبلغ حوالي ثلاثة ملايين مرة كتلة الشمس. كل شيء يتوافق. ولكن على الرغم من أن لدى الفلكيين نموذج متسق ذاتياً للكيفية التي تشكلت بها المجرات الأولى، إلا أنه لا يزال هناك الكثير مما ينبغي تفسيره، بما في ذلك العلاقة المثيرة للاهتمام بين كتلة الثقب الأسود في قلب المجرة وخصائص المجرة المحيطة به.

يبدو من المستبعد جداً أن الثقوب السوداء هائلة الضخامة قد تشكلت أولاً ثم نمت المجرات حولها. يجب أن تكونا قد تشكلتا معاً _في عملية يشار إليها أحياناً بالتطور المشترك_ من البذور التي تقدمها الثقوب السوداء الأصلية بكتلة تبلغ بضع مئات من الكتلة الشمسية والمواد الخام في سحب الباريونات الكثيفة في عُقد البنية الخيطية.

لم يتم بعد الكشف عن تفاصيل الكيفية التي حدث بها هذا التطور المشترك التكافلي، ولكن من السهل أن نرى بشكل عام كيف أن الطاقة المتدفقة من الثقب الأسود المتنامي ستؤثر أولاً على الطريقة التي تتشكل بها النجوم في المادة المحيطة، ومن ثم ستوقف نمو ونشاط الثقب الأسود في مرحلة حرجة عن طريق دفع السحب المحيطة من الغاز والغبار بعيداً، وفي نفس الوقت ستوقف المرحلة المبكرة لتشكل النجوم السريع. وهذا يتوافق مع ملاحظات المجرات النجمية التي تُرى فيها الرياح الحاملة لما يصل إلى ألف كتلة شمسية من المواد سنوياً، تتدفق من المناطق المركزية؛ هذه الرياح _بينما تستمر بعملها_ ستثير تشكل النجوم في السحب الكثيفة بين النجوم، فتضغطها بينما تهبّ عليها. وبينما يبتلع الثقب الأسود نسبة ٠,٢٪ من الكتلة المتاحة، يتحول نحو ١٠٪ من المادة الباريونية إلى نجوم.

قد تكون جميع المجرات القرصية والبيضاوية تحمل ثقوباً سوداء مركزية، لكن المجرات غير المنتظمة لا تحوي ثقوباً سوداء مركزية.

العمليات التي وصفتُها حتى الآن تفسر أصل المجرات البيضاوية والقرصية الصغيرة. ولكن يبدو أن المجرات البيضاوية العملاقة قد تشكلت من خلال اندماج المجرات الصغيرة. في الوقت الحاضر، مجرة درب التبانة ومجرة أندروميدا تتحركان نحو بعضهما بسرعة مئات الكيلومترات في الثانية. لا تتجه المجرتان نحو تصادم رأسي، ولكن في غضون أكثر من حوالي ١٠ مليارات سنة ستكونان قد اندمجتا معاً لتشكلا مجرةً بيضاويةً عملاقةً. هناك بعض الأدلة على أن مجرة أندروميدا قد نمت إلى حجمها الحالي عن طريق ابتلاع مجرة كبير إلى حد ما، لأنها تبدو ثنائية النواة. ولكن الاندماج المتوقع بين مجرتين قرصيتين ناضجتين سيكون أكثر إثارةً بكثير.

وسيطلق الاندماج النهائي للثقبين الأسودين المركزيين عصفةً من الطاقة ستثير مرحلةً أخيرة من النشاط النجمي قبل أن يستقر العملاق البيضوي الجديد في حياة هادئة. ويمكن رؤية المرحلة قبل الأخيرة من هذا الاندماج فعلياً في المجرة NGC ٦٢٤٠، حيث تفصل بين ثقبين أسودين مسافة كيلو فرسخي واحد أو ما يقارب ذلك، ويتحركان معاً على مسار تصادمي في قلب المجرة.

فالشمس إذن في مركز المنظومة الكوكبية، ونحن نعرف الآن أنها جسم ضخم... إنها تهيمن على كل شيء آخر إلى حد أنه لا يجافي العقل أن نتحدث عن مجموعة الأجسام برمتها بوصفها المنظومة (المجموعة) الشمسية.

البدايات

إسحاق عظيموف

الفصل الخامس
الكواكب والأقمار

المنظومة الشمسية [٤]:

افترض بيفون عام ١٧٤٥ نمطاً لتشكل المجموعة الشمسية فقال بارتطام جسم كبير الحجم جداً بالشمس ألقى بحطام الشمس بعيداً، ثم تبرّد هذا الحطام وشكّل الكواكب. فتكون الكواكب قد تكونت في نفس الوقت، في حين تكون الشمس أقدم منهم. وهذه فكرة جيدة غير أنه لا دليل عليها فهي مجرد افتراض.

ثم قام الفيلسوف الألماني إمانويل كانط في عام ١٧٥٥ بطرح فكرة قد يكون بناها على أفكار سابقة لنيوتن، حيث قال بأن المجموعة الشمسية قد نشأت في البداية على هيئة سحابة من الغاز والغبار الذي تجمع وشكّل الشمس. حيث تكتسب جسيمات المادة طاقةً حركيةً بتحركها نحو الداخل بتأثير الجاذبية. وبتوقف الحركة عند تكوين الشمس تحولت هذه الطاقة إلى طاقة حرارية صنعت سطوع الشمس.

لم تحظ هذه الفكرة بالاهتمام، فلم تجد أي دليل يسندها. إلا أن الفلكي الفرنسي بيير سيمون ده لابلاس طرح نفس الفكرة في عام ١٧٩٨ ولكن بتفصيل أكثر. وربما لم يعلم لابلاس بفكرة كانط.

اقترح لابلاس أن سحابة الغاز والغبار كانت تلف بسرعة، وزادت سرعة دورانها باطراد مع تكثفها وفقاً لقانون حفظ الزخم الزاوي. في النهاية ستلف بسرعة عالية فتصبح جسماً ذو شكل عدسيّ، وتُطرد المادة التي على الأطراف بتأثير قوة الطرد. وحينها تتبرد هذه المادة وتتكثف لتصبح كوكباً.

تقل سرعة دوران الكتلة الرئيسية للسحابة بضياع المادة الكوكبية. ولكنها تزداد من جديد بتزايد كثافة السحابة، ثم تعود لتقِل بطرد الأطراف مرةً أخرى، وهكذا. وبهذه الطريقة تتشكل سلسلة من الكواكب تلف حول نفسها وحول الشمس. وقد أشار لابلاس على مثال لهذا، ففي مجرة أندروميدا بقعة من السحاب _أول من وصفها كان الألماني سيمون ماريوس عام ١٦١١_ أطلق عليها اسم مذنب أندروميدا. واقترح أن مذنب أندروميدا هو سحابة من الغاز والغبار تتكثف لتصبح مجموعة من الكواكب كمجموعتنا. وأصبحت فرضية لابلاس في تكوين المجموعة الشمسية تُعرف بفرضية المذنّب. وفقاً لهذه الفرضية فإن الكوكب الأبد عن الشمس هو الكوكب الأقدم وكلما اقتربنا من الشمس صارت الكواكب أحدث.

---

٤ [٤] عظيموف، إسحاق: البدايات (قصة نشوء الإنسان-الحياة-الأرض-الكون).

وقد تبين أن عدة ملاحظات ثانوية تتّفق مع هذه الفرضية، فمن الممكن للكواكب أن تفصل بعض حلقاتها الأصغر فتكوّن توابع. ولزحل حلقات تشكّل دائرةً حوله أقرب إليه من أي تابع مرئي له. وقد أثبت عالم الرياضيات الأسكتلندي جيمس كلارك ماكسويل في عام ١٨٥٩ أن هذه الحلقات هي عبارة عن جسيمات صغيرة. وظهر هذا مثالاً لما تحدث عنه لابلاس. وعند اكتشاف حزام الجسيمات هذا بان كحالة من حالات طوق المادة التي لم تستطع الالتحام وقد يكون ذلك نتيجةً لتأثير التشويش الناتج عن جاذبية كوكب المشتري.

ومن الواضح أن نظرية هلمهولتز عن اكتساب الشمس لطاقتها من الانكماش البطيء تتّسق مع فرضية المذنب للابلاس. ولكن المشكلة كانت في اللف السريع أو الزخم الزاوي، فيوجد في جزء من المجموعة الشمسية قدر من الزخم الزاوي أكثر من اللازم.

فلا تشكل الكواكب أكثر من ١٪ بكثير من كتلة المجموعة الشمسية، وعلى الرغم من هذا فإن الكواكب تشكل ٩٨٪ من الزخم الزاوي في المجموعة كلها. كيف للكواكب أن يتشكل بها كل هذا القدر من الزخم الزاوي؟ حين بدأت السحابة تتكثف _حسب فرضية المذنب_ كان عليها أن تملك كمية الزخم الزاوي للمجموعة. وكلما انفصل طوق من المادة يستنزف قدراً من الكمية، ولكن لم يكن بالإمكان تخيل كيفية تجمع ٩٨٪ من الكمية في أطواق المادة.

وعند نهاية القرن التاسع عشر، كان على الفلكيين أن يتخلوا عن فرضية المذنب بعدما عجزوا عن حل هذه المشكلة. ولكن، فإنه من اللازم العثور على حل آخر. فتوجه الفلكيون إلى فرضية بيفون من جديد التي تفترض أن تشكّل المجموعة الشمسية كان عبر اصطدام وليس عبر تكثف.

وقد نجح العالمان الأمريكيان توماس تشامبرلين وفورست مولطن في عام ١٩٠٠ بعرض نتائج مرور نجم آخر بالقرب من الشمس بشكل كبير (حيث لم يعتقدا بضرورة الاصطدام) واستنتجا أن الجذب بينهما سيجرف كتلةً من المادة تمتد بين النجمين إبان افتراقهما عن بعض. ثم تتكثف المادة الحارة المنزوعة من النجمين وتصبح أجساماً صغيرة (كويكبات) تتحرك في مدارات عشوائية حول الشمس فتتصادم مع بعضها. فتنتهي هذه التصادمات بزيادة حجم الكويكبات الكبيرة على حساب الصغيرة حتى توجد أخيراً الكواكب. وتسمى فرضية تشامبرلين-مولطن هذه بفرضية الكويكبات.

وبالنسبة للزخم الزاوي، فقد بيّن الفلكيان الإنجليزيان جيمس جينز وهارولد جفريز بأن حقلي الجاذبية للنجمين عند انفصالهما يشد كتلة المادة المنتزعة بقوة كبيرة. مما يراكم فيهما الزخم الزاوي على حساب النجمين. وهذا ما دعم فرضية الكويكبات بشكل كبير. فتعود فرضية الكويكبات إلى فرضية بيفون بوجود الشمس قبل وجود الكواكب بزمن بعيد، ولم يتحدث عن زمن وكيفية تكوّن الشمس.

وعند بدايات الـ ١٩٢٠ برهن الفلكي الإنكليزي آرثر إدنجتون على أن حرارة جوف الشمس أكثر بكثير مما كان متوقع، وقدر وصولها إلى ملايين الدرجات في مركزها. الذي لولاه لما كان بمقدور الشمس تجنّب التكثّف في جسم صغير من تأثير جاذبيتها. (وظهرت ضرورة هذه الدرجات الحرارية المركزية بعد اكتشاف أن الشمس تستمد طاقتها من الاندماج النووي). ومعنى ذلك هو ان المواد التي جُذبَت من مسافة قريبة من النجوم كانت أكثر حرارةً بكثير مما قدّره أصحاب فرضية الكويكبات.

ولكن الفلكي الألماني كارل فريدريش فون فايتسيكر عاد في عام ١٩٤٤ إلى فرضية المذنب، بعتاد جديد من الأدوات الرياضية. فافترض أن السحابة التي تتكثف لم تكن تطرد بأطواقها الغازية إلى الخارج بل تكثفت بشكل أسرع، مما أبقى قرصاً كبيراً حولها من الغاز والغبار، يحوي داخله دوامات ودوامات فرعية قوية جداً. وفي تصوره، تحمل هذه الدوامات مواداً وتدفعها للتصادم فتشكّل الكويكبات التي يزيد حجمها باستمرار التصادمات حتى تتشكّل الكواكب. وقد أظهرت المعالجة الحاسوبية كيفية تشكّل الكواكب على مسافات متزايدة من بعضها بازدياد حجم الدوامات مع زيادة المسافة بينها وبين الشمس. وتبيّن فرضية فايتسيكر هذه أن الشمس والكواكب تشكّلوا في الوقت ذاته تقريباً. وبهذا يمكننا الاستنتاج بأن عمر مجموعتنا الشمسية حوالي ٤,٥ مليار سنة أو تزيد قليلاً مع حساب فترة الكويكبات السابقة. وتؤكد ذلك أعمار النيازك وأقدم الصخور التي حصلنا عليها من القمر. ولكن موضوع الزخم الزاوي لا يزال دون حل.

وجاء الفلكي السويدي هانس ألفن ونظر في الحقل المغناطيسي للشمس، وافترض دوران الشمس الفتية بسرعة كبيرة مما ثنى حقلها المغناطيسي معها فأبطأ سرعتها. أي أن الزخم الزاوي قد انتقل من الشمس إلى الكواكب، مما دفع الكواكب إلى مسافات أبعد عن الشمس.

تحظى هذه الصيغة الجديدة لفرضية المذنب بالقبول عند الفلكيين بوجه عام، كما أنها لم تُغفل على ما يبدو أي مشاكل رئيسة بدون حل. تقول الفرضية بتشكّل الكواكب من كويكبات جُرفت بالتدريج خارج مدارات الكواكب. وقد بقيت بعض الكويكبات قبل انجرافها حتى حين كانت الكواكب بحجمها الراهن تقريباً. وتركت آخر التصادمات علامات في شكل فوهات. وهذه الفوهات قد أصبحت معروفةً لدينا. فمذ نظر غاليليو من منظاره قد عرفنا فوهات القمر. كما أن معظم هذه الفوهات تعود لأربعة مليارات عام، حين كانت الكويكبات لا تزال منتشرة، مع العلم بأن بعض الفوهات قد تشكّلت في وقت أقرب من ذلك فالتصادمات لم تتوقف حتى الآن.

والاختلاف المهم بين الفرضية السديمية والكويكبية هو في أنه لو كانت الأولى صادقة في أن المجموعة الكوكبية قد تشكّلت بتكثف سحابة من غبار وغاز، فقد تكون النجوم قد تكونت

على هذا النحو وأمكن أن يوجد كواكب من نوع ما لكل النجوم. وقد كشف قمر صناعي مُعدّ لكشف الأشعة تحت الحمراء عن وجود هذه الأشعة بالقرب من بعض النجوم. والأشعة تحت الحمراء تشير إلى وجود مادة باردة نسبياً، وبالتالي فيظهر أن هذه النجوم محاطة بمادة باردة. ويبيّن التحليل الدقيق تطويق نجوم مثل فيجا وبيتا بكتوريس بالكويكبات، فقد تكون كواكب قيد التشكّل أو أنها تشكّلت بالفعل. مما يدعم الصورة السائدة حول الكيفية التي نشأت بها المجموعة الشمسية.

لماذا كل الأقمار؟ [٥]

إلى الآن، لن يفاجئنا القول بعدم وجود إجابة مباشرة على سؤال ما إذا كانت الأقمار قد نمت بطريقة ما إلى جانب كواكبها أو تم الحصول عليها لاحقاً. والأقمار الكبيرة المتحركة عكس اتجاه عقارب الساعة التابعة للكواكب العملاقة هي الأسهل للتفسير. فيُعتقد أنها تشكّلت داخل سحابة من الغاز والغبار المحيطة بكل كوكب عملاق خلال نموّه، كنسخة مصغرة من السديم الشمسي. الأقمار الصغيرة المتحركة البالغة من الحجم بضع كيلومترات التي تدور بالقرب من الكواكب العملاقة هي على الأرجح شظايا من الأقمار الكبيرة التي اقتربت بشدة وتفكّكت. والأقمار الخارجية للكواكب العملاقة هي في الغالب مدارات عكسية (باتجاه عقارب الساعة)، وهذه غالباً أجسام تم التقاطها بدأت على شكل كويكبات، أو أجرام وراء نبتونية (TNOs)، أو نواة مذنب.

نظرياً، يكاد مستحيلاً لكوكب أن يلتقط زائراً عابراً في مدار حول نفسه. سيتأرجح الجسم الصغير العابر بفعل جاذبية الكوكب، ولكن لا يمكن بسهولة أن يتباطأ بما فيه الكفاية ليتم التقاطه في مدار. ومع ذلك، إذا كان الزائر جسماً ثنائياً، فيمكن التقاط واحد منهما عن طريق نقل الزخم إلى الجسم الآخر، الذي سينطلق بعيداً بشكل أسرع بعد التقارب.

هناك تفسير مفضّل حالياً لقمر نبتون الكبير (ترايتون) الذي يدور باتجاه عقارب الساعة، وهو أنه كان سابقاً نصف جرم وراء نبتوني ثنائي الذي انحرف مقترباً من نبتون. وهذا يبدو معقولاً، لأن العديد من الأجرام الوراء نبتونية معروفة بأنها ثنائية. وللتذكير، إن هذا يترك دون حل مسألة لماذا الكثير من الأجرام الوراء نبتونية _والكويكبات أيضاً_ لديها أقمار من الأساس؟

لقمر الأرض تفسير مختلف، فيبدو أنه قد تكاثف من الحطام الذي ألقي في مدار حول الأرض عن طريق آخر تصادم بين جنينين كوكبيين من السلسلة التي نما منها كوكب الأرض. والقمران الصغيران للمريخ (فوبوس وديموس) هما كويكبان، لم يتم فهم كيفية التقاطهما في مدارين دائريّين قريبين.

---

٥ ° Rothery, David: Planets ‹A very short introduction›.

كوكبنا الأرض [٦]:

تشكّلت الأرض _كباقي الكواكب_ قبل ٤,٥ مليار سنة من سحابة الغبار والغاز. وقد كانت عند نشوئها في البداية متزعزعة، وحجمها أضعاف حجمها الحالي. ونتيجةً للزيادة في وزنها وفي دورانها حول نفسها زاد ارتصاصها على نفسها فانكمش حجمها. وعمل الضغط الذي ولدته الجاذبية على تسخين المركز. مما أدى لإذابة مواده، وبدأت الجاذبية آنذاك في فصل العناصر المختلطة تبعاً لوزنها فأصبحت النواة مكوّنةً من المعادن الثقيلة التي ساهمت بتشكيل طبقات النواة من خلال الخلط البطيء الجذري لها.

وهذا ما حدث لسطح الأرض. فتسخن تسخيناً مؤقتاً ليصير ليناً شبه سائل، وكان لازماً ألا يتسخن أكثر من هذا حتى لا تتفكك الروابط الكيميائية الرابطة للعناصر المشكلة لسطح الأرض ويسيل.

ويشير النشاط الإشعاعي للمواد الأرضية إلى أن عمر الأرض حوالي ٤,٥ مليار سنة. فقد كانت نتيجة فحص حبيبات من بلورات الزيركون (وهو مركب كيميائي شديد الصلابة لا تتأثر بلوراته بالعوامل الجوية ودرجات الحرارة والضغط) وُجدت في موقعي (جاك هيلز) و(مونت ناريّر) غرب أستراليا بواسطة (المسبار الميكروي الإيوني عالي الحساسية) أن عمرها ٤,٤ مليار سنة.

ظلت عملية التصلب بين (١ – ١,٥) مليار سنة قبل وصول السطح إلى صلابته الحالية تقريباً. وقبل ذلك قد كان للأرض سطح ساخن من كتل التراكيب الكيميائية النارية البازلتية والغرانيتية. وكانت نواة الأرض شديدة الحرارة تسيل فيها المواد الثقيلة بتموج عظيم بسبب الغازات الحبيسة في النواة. ولم يكن للأرض غلاف جوي آنذاك، في حين سبّب ضغط النواة تشقّق سطح الأرض وخروج جزء من المادة والغاز الحبيس في النواة إلى السطح بصورة براكين، تنبعث الغازات في الفضاء لتشكل الغلاف الجوي الأول وتبرد حمم البراكين بشكل صخور نارية.

شكّل بخار الماء نسبة ٩٧٪ من الغلاف الجوي الأول، والـ٣٪ الباقين شكّلتها غازات الهيدروجين والفحم والآزوت والميثان والنشادر، وتواجد في أحيان قليلة أكسيد الكبريت. وهي تركيبات غير عضوية لكن أغلبها يسهم في تشكّل المركبات العضوية غير الحية عند وجود المحفز المناسب.

لم يكن في هذا الغلاف الأول أي أوكسجين حر. كيميائياً، ينتج عن أكسدة الأوكسجين لفلزات الحديد أكسيد الحديد الثلاثي (Fe_2O_3)، وهو أساس تكوين الصدأ. على عكس الجو غير الحاوي للأوكسجين الذي يكون فيه نفس الفلز أكسيد الحديد الثنائي (Fe_2O_2). وقد تأكد للعديد من الجيولوجيين وجود آثار أكسيد الحديد الثنائي عند دراسة عينات صخرية من عينات في عمق الأرض عمرها ما بين ٢-٣ مليارات سنة. عُثر عليها عميقاً بسبب حدوث طيّ لطبقات القشرة الأرضية. كما ثبت تعرضها للحتّ قبل نزولها للأعماق نتيجة عناصر الغلاف الجوي. فلم يكن

٦ [٦] الرحمون، أحمد: جذورنا (دراسة موسوعية في الكون والتطور والإنسان).

الغلاف الجوي الذي قام بحتّ الصخور يحتوي على الأوكسجين الحر، بدليل الآثار التي تركها الحتّ على تواجد أكسيد الحديد الثنائي وعدم وجود الثلاثي.

لم يكن باستطاعة ضوء الشمس العبور إلى سطح الأرض بسبب نسبة بخار الماء المرتفعة، فقد كان الضوء الوحيد هو ضوء برق العواصف الرعدية آنذاك. وفي حين كانت طبقات الغلاف الجوي الأبعد عن سطح الأرض تبرد، كانت الطبقات الأقرب تزداد حرارتها نتيجة امتصاصها للحرارة من سطح الأرض. وقد ولّد هذا الفرق بين درجات حرارة طبقات الغلاف الجوي إلى تأثيرين. الأول، وهو الحركة المستمرة للغلاف الجوي حيث تهبط الطبقات الأبرد وترتفع الطبقات الأسخن لترسل بحرارتها إلى الفضاء الخارجي، وهذا ما ساهم في تبريد سطح الأرض. والثاني، أن عملية التبريد هذه قد ساعدت في التكاثف المستديم لبخار الماء في الطبقات الباردة العليا وهطولها كأمطار تعود وتتبخر بفعل حرارة سطح الأرض الذي كان يزيد عن ١٠٠ درجة مئوية، ومن ثم تعود وتتكاثف ثم تهطل وهكذا. وبقيت عملية تبريد سطح الأرض هذه قائمة إلى أن وصلت حرارته إلى أقل من حرارة تبخر الماء.

وهكذا، أصبحت الأمطار تستقر على الأرض _بدلاً من أن تتبخر عند وصولها للسطح_ وتسير إلى المناطق المنخفضة. ومع الوقت تراكمت مياه الأمطار في المنخفضات وشكّلت البحار والمحيطات الدافئة. وهكذا، فقد أصبح الغلاف الجوي شفافاً بعد أن هطل قسم كبير منه كمطر يحمل جزيئات عضوية غير حية. وكانت الرياح العارمة تولد أمواجاً في المياه أدت بدورها إلى نقل الجزيئات العضوية غير الحية إلى مختلف الأعماق. وبعد أن أصبح بإمكان أشعة الشمس الوصول إلى سطح الأرض، فعلت الأشعة فوق البنفسجية أفعالها من تركيب وتفكيك في الجزيئات العضوية غير الحية.

لا يزال هناك القدر الكبير مما لا نعرفه أو نفهمه عن الكون. ولكن التقدم الرائع الذي أحرزناه، لاسيما في المئة سنة الأخيرة، ينبغي أن يشجعنا على الاعتقاد بأن الفهم الكامل قد لا يتجاوز مقدرتنا. فقد لا يكون محكوم علينا أن نتلمّس في الظلام إلى الأبد. فقد نقوم باختراق إلى نظرية كاملة للكون. في تلك الحالة، سنكون بالفعل أسياد الكون.

الثقوب السوداء والأكوان الطفلة

ستيفن هوكنج

قائمة المصادر والمراجع

إنكليزي:

Close, Frank: Nothing (A very short introduction), New York, Oxford University Press, ٢٠٠٩.

Krauss, Lawrence: A universe from nothing (Why there is something rather than nothing), New York, Free Press, ٢٠١٢.

Tyson, Neil & Goldsmith, Donald: Origins (Fourteen billion years of cosmic evolution), New York, W.W.Norton & Company, ١st, ٢٠٠٤.

Gribbin, John: Galaxies (A very short introduction), New York, Oxford university press, ٢٠٠٨.

Brown, Cynthia: Big History (From the big bang to the present), New York, The New Press, ٢٠٠٨.

Rothery, David: Planets (A very short introduction), New York, Oxford University Press, ٢٠١٠.

Hawking, Stephen & Mlodinow, Leonard: The Grand Design, New York, Bantam Books, ٢٠١٠.

Hawking, Stephen: Black Holes And Baby Universes And Other Essays, New York, Bantam Books, ١٩٩٣.

عربي ومترجم:

عظيموف، إسحاق: البدايات (قصة نشوء الإنسان-الحياة-الأرض-الكون)، تر: ظريف عبد الله، القاهرة، المجلس الأعلى للثقافة، عام ٢٠٠١.

الرحمون، أحمد: جذورنا (دراسة موسوعية في الكون والتطور والإنسان)، دمشق، دار علاء الدين، ط١، عام ٢٠٠٧.

فايفر، جون: بداية الكون (من الأفلاك إلى البشر)، تر: د. محمد الشحات، القاهرة، مؤسسة سجل العرب، ١٩٥٩.

من هنا تبدأ قصة الوجود...حيث لم يكن هناك شيء... حيث العدم.

لطالما تساءل الإنسان عن نشأة ووجود الكون وتغيراته، ولطالما حاولت الفلسفات قديماً والعلوم حديثاً الإجابة عن ذلك..

وعلى الرغم من معرفتنا القاصرة وعدم معرفتنا بالجواب القاطع لهذا التساؤل، إلا أن التقدم الذي يُحرزه العلماء لحل هذا اللغز واضحٌ وملموس على الصعيدين النظري والتجريبي.

والحديث عن نشأة الكون وصيرورته وفقاً للنماذج المطروحة في العلم الحديث قد يطول كثيراً بما لا يخدم غرض الكتاب الأساسي الذي تهدف من خلاله إلى توضيح فكرتين أساسيتين وهما:

1ـ إثبات قدرة العقل البشري على تعقل الكون وفهمه.

2 ـ استعراض القارئ لنماذج تحكي تاريخ هذا الكون الذي سمحت ظروف نشأته بتطور كائنات مثلنا. تملك ما يكفي من الذكاء والوعي لتقوم بتفسيره بالرصد والتجريب.

ISBN 978-9933-607-02-9

9 789933 607029

دار ظما للطباعة والنشر و التوزيع

سوريا ـ السويداء ـ الشارع المحوري

هاتف : ٠٠٩٦٣-١٦-٢٣٠١٦١

تلفاكس : ٠٠٩٦٣-١٦-٢٣٦٠٩٨

fatenbookshop-yahoo.com